

« Conduite de la recherche sur la fertilité des sols : élaboration des protocoles d'essais agronomiques & analyse des résultats »

Atelier du 8 au 18 décembre 2009

**Station Agronomique de l'ITRAD
de Bébédjia (Tchad)**

**Manuel pratique d'élaboration d'un protocole d'essai, depuis la
conception jusqu'à la rédaction du rapport de campagne.**

Jean Louis Bozza

Jacques Arrivets



cirad



INTRODUCTION

Le séminaire sur « La conduite de la recherche sur la fertilité des sols » qui s'est déroulé à Bébédjia du 8 au 18 décembre 2009 est à l'origine de ce document. Dans un premier temps, ce séminaire devait consister simplement en des échanges entre quelques chercheurs de l'ITRAD et un agronome rompu aux expérimentations agronomiques, retraité du CIRAD (voir en annexe les termes de référence de la mission). Le faible nombre de participants prévus devait permettre de personnaliser ces échanges en s'appuyant sur les résultats concrets et les problèmes de ces derniers.

En réalité, nous nous sommes trouvés devant un nombre plus important de participants que prévu (voir liste en annexe hors thème), sans expérience du sujet traité, à l'exception de quelques uns, et sans résultats personnels sur lesquels s'appuyer pour animer le séminaire. Après sondage, il est apparu que leur attente concernait l'expérimentation agronomique, et plus particulièrement les aspects statistiques de la question ; bien que ce ne soit pas, à notre avis, le principal, cela paraissait le plus important aux yeux des participants.

C'est au pied levé qu'il a fallu nous adapter à la demande, et cela tant bien que mal. Aussi, plutôt que de reporter les exposés improvisés que nous avons dus faire, nous avons préféré les reprendre et les compléter pour rédiger ce présent manuel, pratique, depuis l'élaboration d'un protocole d'essai jusqu'à la rédaction du rapport de campagne.

Ce manuel est divisé en deux parties de trois chapitres : la première partie est consacrée à l'analyse générale des problèmes à traiter et aux connaissances d'agronomie générale à prendre en compte, c'est à notre avis, la phase la plus importante ; le premier chapitre traite des « Besoins de la plante » ; le second du « Climat, des cultures et des pestes » et le troisième de « la fertilité des sols ».

La seconde partie est consacrée au volet des « statistiques » tant *magnifiées* par les participants. Faute de supports concrets à traiter, nous nous sommes appuyés sur les données d'un essai fictif adapté d'un exemple tiré du remarquable ouvrage de M. Lecompt (voir Cd rom chap.4). Ici, le quatrième chapitre porte sur la théorie de l'expérimentation ; le cinquième sur la pratique de l'expérimentation et le dernier depuis la conception du protocole jusqu'à la rédaction du compte-rendu d'essai.

L'intérêt de ce séminaire s'était imposé à nous, suite aux difficultés rencontrées par les chercheurs du Centre de Recherche Agronomique de Bébédjia à rédiger rapidement leur rapport de fin de campagne agricole. Ce retard se répercute dans la chaîne de décisions qui ne permet plus à la commission scientifique de se réunir à temps pour évaluer les résultats d'étapes. La commission entérine les souhaits des chercheurs sans pouvoir proposer ses propres recommandations.

Le chercheur est le premier pénalisé dans la mesure où, pressé par le temps, il n'a pas le recul nécessaire pour juger avec la commission scientifique des améliorations à apporter à ses recherches. Enfin, ce retard est préjudiciable également auprès des techniciens et des observateurs chargés de la mise en place et du suivi des essais agronomiques, et plus généralement de l'ensemble des partenaires de la recherche agronomique sur les « points d'essais » et les parcelles paysannes par défaut de restitution des activités en cours..

1^{ère} partie : Rappel de notions d'agronomie.

Sommaire

1^{ère} partie : Rappel des notions d'agronomie

fig : 1.1

Chapitre 1 : besoins de la plante

1.1 Morphologie de la plante et fonctions des différentes parties

1.2 Composition minérale d'une plante cultivée

Tab.1.1, fig.1.2, fig. 1.3,
Tab.1.2

1.3 Croissance et développement

fig.1.4, fig.1.5

1.4 Retour sur les mobilisations minérales, variation des besoins au cours du cycle

Tab.1.3

1.5 Besoins en eau de la culture

fig. 1.6, Tab.1.4

1.6 Fiche technique et fiche de culture

Chapitre 2 : le climat, les cultures et les pestes.

fig. 2.1

2.1 Les systèmes et le climat.

2.1.1 : Relations entre systèmes et climats

fig. 2.2

2.1.2 : Le climat du sud du Tchad

fig. 2.3, fig. 2.4

2.1.3 : calendrier agricole

2.1.4 : Les systèmes basés sur le coton

2.2 Bilans hydriques, indices de satisfaction des besoins en eau de la culture

2.2.1 : les termes du bilan hydrique

fig. 2.5

2.2.2 : mesures de l'ETP et des Kc

2.2.3 : exemple de Moundou

fig. 2.6, Tab.2.1

2.2.4 : les solutions envisageables

2.3 Les pestes

2.3.1 : maladies et parasites

2.3.2 : mauvaises herbes

Chapitre 3 : Fertilité des sols

3.1 Les sols : profils pédologiques et chaîne des sols

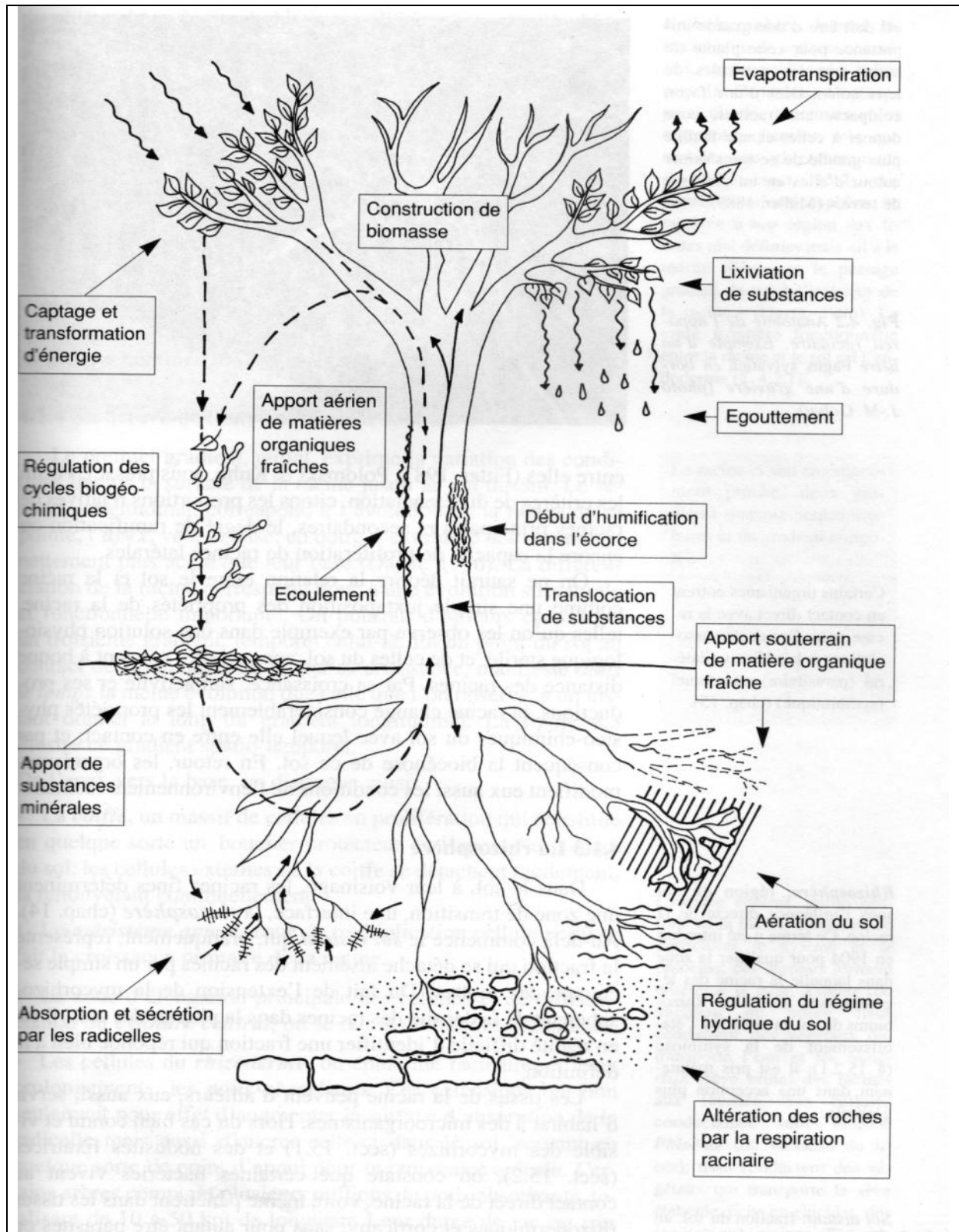
fig. 3.1

3.2 Caractéristiques physiques et capacité d'échange des constituants

3.2.1 : Caractéristiques physiques	
3.2.2 : Caractéristiques chimiques	fig. 3.2
3.3 Les principaux sols exondés des zones soudaniennes.	
3.3.1 : A propos des classifications	
3.3.2 : ce qui est déjà acquis à propos de leur fertilisation ...	
3.4 Evolution de la fertilité des sols sous culture, le sol « produit du système de culture »	
3.4.1 : la végétation naturelle et les sols ;	
3.4.2 : évolution des sols après leur mise en culture	
3.4.3 : les jachères et leur rôle :	
3.5 Bilan minéral du système coton-sorgho.	
3.5.1 : fumure strictement minérale	Tab. 3.1
3.5.2 : avec apport complémentaire de fumier	Tab. 3.2
3.5.3 : la révision de la fumure minérale est nécessaire	Tab. 3.3
3.6 De l'efficacité des engrais minéraux	
3.6.1 : les différentes sortes d'engrais, plus ou moins concentrés	
3.6.2 : solubilité des engrais et dates d'épandage.	
3.6.3 : lois d'actions des engrais minéraux	fig. 3.3
3.6.4 : fumure initiale et fumure d'entretien, de redressement : effets directs, résiduels et cumulatifs	Tab. 3.4, Tab.3.5 fig. 3.4, fig.3.5

1^{ère} partie : Rappel de notions d'agronomie.

Figure 1.1 : Fonctions principales des plantes en relation avec les processus pédologiques *source : "le sol vivant" (Presses polytechniques et universitaires romanes)*



CHAPITRE 1 – BESOINS DE LA PLANTE

Il ne s'agit pas ici de faire un cours d'agriculture, on ne traitera comme exemple support que le cas des cultures pluviales et plus précisément des céréales à grandes tiges : sorgho, mil et maïs qui sont largement cultivées dans le pays ; les cas de l'arachide, du coton et des niébés, autres cultures essentielles, sont assez différents, ne serait-ce que par leur floraison échelonnée ; quant au cas du manioc, c'est encore une autre affaire.

Les principes et méthodes d'expérimentation restant les mêmes dans tous les cas

1.1 : **Morphologie de la plante et fonctions de ses différentes parties** : en simplifiant une plante cultivée comprend deux grandes parties :

- La partie aérienne, composée pendant la 1^{ère} moitié de son cycle (période végétative) uniquement de tiges et de feuilles ; s'y ajoute plus tard l'appareil reproducteur qui conduira via la fécondation à la création du réservoir d'amidon, puis à son remplissage, pour aboutir à la production finale récoltée.
- La partie souterraine : le système racinaire invisible, difficile à étudier, donc moins connu : **son rôle est souvent sous-estimé dans l'obtention d'une bonne récolte.**

Les feuilles peuvent être considérées comme l'usine de la plante, par l'intermédiaire des stomates que l'on compte par millions à leurs faces inférieures, elles assurent les fonctions essentielles :

- d'abord la transpiration (régulation thermique), la respiration et puis, la photosynthèse qui fabrique le glucose, élément premier dans la production des composés organiques complexes : les «assimilats».
- ensuite la synthèse de ces assimilats, à partir du glucose et des éléments minéraux que les racines extraient du sol et leur envoient dans la sève brute via les vaisseaux du bois (ou xylème) ; les assimilats sont ensuite distribués dans toute la plante par la sève élaborée via les vaisseaux du liber (ou phloème).

Les assimilats sont utilisés pendant la phase végétative à la croissance des tiges et des feuilles, ensuite principalement dans les organes reproducteurs, puis stockés dans les grains; une partie des composés jusqu'alors constituants de l'appareil végétatif est alors également transformée et transférée dans les grains sous forme d'amidon...

Le système racinaire extrait, avec l'eau stockée dans la réserve utile du sol (alimentée par les pluies), les éléments minéraux en solution :

- une faible partie de cette eau entrera dans la constitution de la plante, où elle figure pour 80 à 90% du poids frais, la teneur en est décroissante des 1^{ers} stades à la maturation, puis la sénescence ; cette eau assurera entre autre le remplissage des vacuoles des cellules, nécessaire au port érigé de la plante.
- une partie incomparablement plus importante sera utilisée pour la transpiration¹. Un plant peut consommer chaque jour en moyenne une quantité d'eau équivalente à son poids (soit environ 8-9 mm /jour au stade maturité pour une production de 6 t de grains/ha).

On voit déjà combien est important le volume de la réserve utile en eau du sol (RU). Elle dépend pour une bonne partie de la nature du sol, mais est surtout **proportionnelle à la profondeur du système racinaire de la culture** qui exploite ce sol.

¹ En culture très intensive, avec irrigation, un plant de maïs peut restituer par transpiration jusqu' à 2740 des 2800 l qu'il a extrait du sol, ce qui correspond à 1400 mm pour un cycle de 6 mois.

En résumé, une culture a besoin :

- d'une part de l'énergie solaire (et d'un certain degré de température qui lui est lié), du CO₂ et de l'O₂ de l'air, ces facteurs lui sont fournis en quantités non limitantes en zone soudanienne.

- d'autre part d'eau indirectement fournie par les pluies et des nutriments disponibles dans les réserves du sol ou apportés par la fertilisation. Ce sont les deux facteurs déterminants en zone soudanienne.

Pendant des générations, les hommes ont sélectionné empiriquement des plantes qui produisaient le maximum de poids de grains par rapport au poids de leurs organes végétatifs, et au total par unité de surface ; ainsi, on caractérise une récolte par le rendement et le rapport grains/pailles à maturité.

La production de grains dépendra finalement du nombre de plants par ha, multiplié par le nombre de grains par plant multiplié par le poids moyen d'un grain, soit :

$$\text{Rdt/ha en grains} = \text{nb de plants/ha} \times \text{nb de grains /plant} \times \text{poids moyen d'un grain}$$

Ce sont ces composantes du rendement que l'on cherche à optimiser par l'amélioration des techniques agricoles, et entre autres la fertilisation.

1.2 Composition minérale d'une plante cultivée :

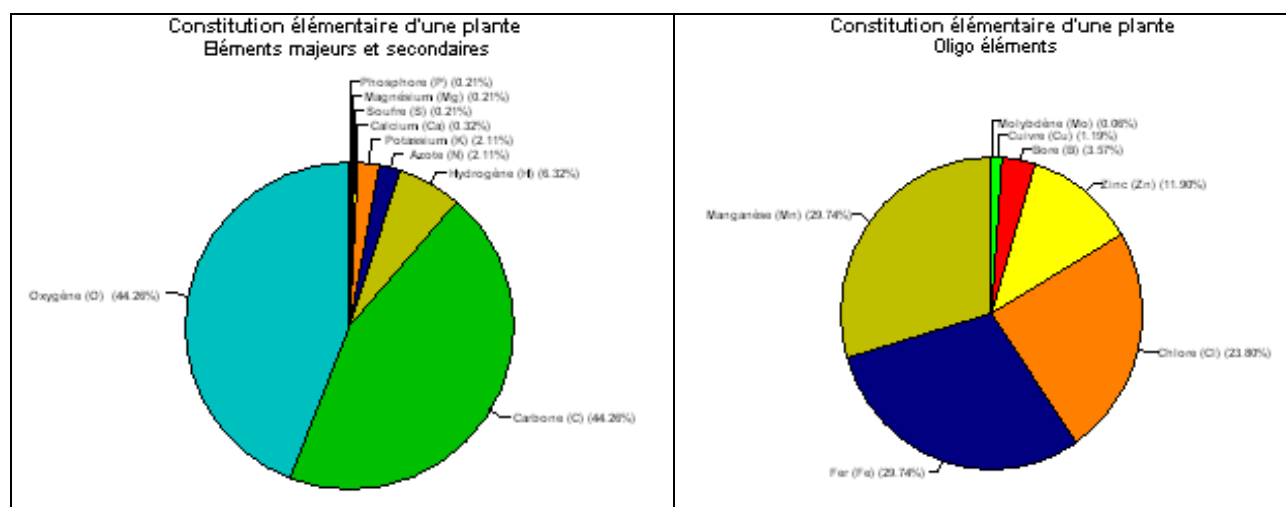
Le tableau 1.1 donne un ordre de grandeur de la composition chimique des plantes, exprimée en % de la matière sèche. L'annexe 1.1 « les bio-éléments majeurs » donne des précisions sur leurs principales fonctions dans les végétaux. On note que les 3 éléments C, O et H représentent environ 90% du total, ce sont (avec N azote) les constituant essentiels des molécules organiques. L'oxygène et l'hydrogène y figurent déjà pour la moitié, encore qu'il ne s'agisse que de la matière sèche alors que l'eau entre pour plus de 80-90 % de la matière fraîche d'une plante. Parmi les éléments constituant des derniers 10% de la matière sèche, on distingue traditionnellement :

- 3 éléments majeurs : N, P et K (azote, phosphore, potassium)
- 3 éléments secondaires : S, Ca et Mg (soufre, calcium, magnésium)
- les oligoéléments en des proportions très faibles, mais qui sont indispensables au métabolisme de la plante ; leur déficience dans les sols (Fe *fer*, Cu *cuivre* et Bo *bore* le plus souvent en Afrique) compromet gravement la production.

Tableau 1.1 : Ordre de grandeur des teneurs en éléments minéraux, en % de la matière sèche (d'après Bertrand et Gigou, 2000)

Eléments	Teneur	
Carbone (C)	40 à 45 %	Constituants principaux
Oxygène (O)	40 à 45 %	
Hydrogène (H)	6 à 7 %	
Azote (N)	1 à 3 %	Eléments majeurs
Potassium (K)	1 à 4 %	
Phosphore (P)	0,1 à 0,4 %	
Calcium (Ca)	0,1 à 0,5 %	Eléments secondaires
Magnésium (Mg)	0,1 à 0,4 %	
Soufre (S)	0,1 à 0,4 %	
Fer (Fe)	50 à 500 ppm	Oligo-éléments
Manganèse (Mn)	20 à 500 ppm	
Zinc (Zn)	20 à 200 ppm	
Bore (B)	Monocotylédone : 5 - 20 ppm	
	Dicotylédone : 20 - 60 ppm	
Cuivre (Cu)	5 à 20 ppm	
Molybdène (Mo)	0,1 à 1 ppm	
Chlore (Cl)	20 à 500 ppm et jusqu'à 10 %	

Figure 1.2 : illustration du tableau 1.1 (contenu minéral des végétaux en %)



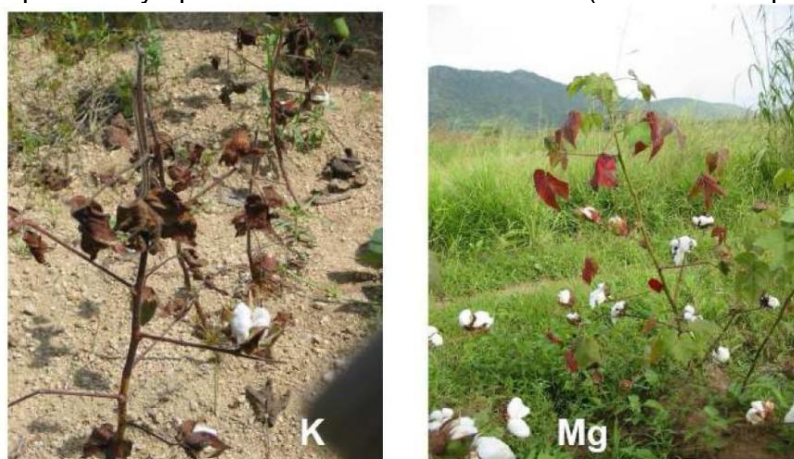
De façon générale, on dit que par sa composition chimique, **la plante est le reflet du sol** ; ce constat est exploité pour identifier les carences minérales d'un sol par la composition minérale de certaines parties des cultures qu'il porte à un stade défini de leurs cycles. Après avoir testé différentes solutions, les chercheurs ont retenu des normes pour les cultures les plus importantes. En général, la partie retenue est le limbe d'une feuille à un stade précis du développement, ainsi pour le maïs : on prend au stade floraison la feuille sous l'épi (ou la feuille opposée). C'est ce qu'on appelle le Diagnostic Foliaire (DF).

Le tableau reporté en annexe 1.2 « les exportations minérales C.Piéri, 1989 » rassemble quelques données sur les mobilisations minérales des principales cultures ; on en a extrait pour le tableau 1.2 les valeurs concernant le sorgho et le coton dont les moyennes seront utilisées dans la suite pour calculer les **bilans minéraux**. La part des tiges (ou pailles) dans les mobilisations finales est prépondérante, en particulier pour la potasse ; encore faut-

il souligner que les teneurs en potasse des tiges sont très variables, en fonction des disponibilités du sol.

Le diagnostic foliaire est un moyen plus sûr d'identification des carences que celui des symptômes visuels dont l'interprétation est assez souvent délicate et peut conduire à des confusions ; ainsi dans le cas de la coloration rouge des feuilles de maïs par exemple, elle est par principe attribuée à une déficience en phosphore alors que c'est aussi un signe de « souffrance » de la plante pour diverses raisons. (voir CD rom chapitre 1 « carences minérales culture »). Ils ne sont vraiment clairs qu'en cas de carence avérée, exemple des carences en K ou Mg sur coton, voir photos ci-dessous ; en cas de déficience modérée, mais suffisante pour justifier une fumure particulière, ils ne sont pas toujours manifestes.

Figure 1.3 Exemples de symptômes de carences minérales (source Cirad programme coton)



Carence en potassium (K) **sur coton** Carence en magnésium (Mg)
(aspect en chauve-souris) (rougissement des feuilles âgées)

Tableau 1.2 : Mobilisations minérales des parties aériennes du sorgho et du coton, en kg/ha d'éléments fertilisants par tonne de produit récolté ; les données en rouge correspondent aux seules exportations par les graines.

culture	Localité	Part aérienne	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO
Sorgho	Cameroun	Total	20,00	11,50	30,00	8,00
		Grains	13,00	8,00	5,00	0,50
	Burkina Faso	Total	35,00	13,70	43,20	11,20
		Grains	16,50	5,90	3,60	0,30
	Moyenne		28,00	13,00	36,00	10,00
			15,00	7,00	4,00	0,40
Coton	Cameroun 1	Total	38,4	17	50,2	22,2
		Graines	17,2	8	9	1,7
	Cameroun 2	Total	25,4	12,9	40,3	8,6
		Graines	18,3	8,4	9,2	2,7
	Cote d'ivoire	Total	36,2	11,1	34,3	15,4
		Graines	22,5	8,2	11,7	2,6
	Benin	Total	30	22,1	30,3	16,9
		Graines	16,6	14,2	6,2	1,2
	Moyenne		32,5	16	40	15,5
			18,5	9,6	9	2

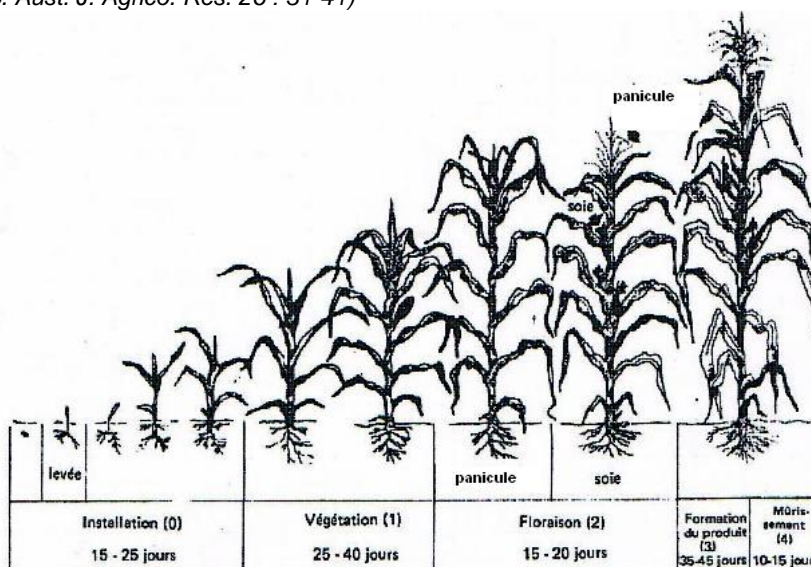
1.3 Croissance et développement (d'après un cours de M. Sébillote)

Le processus de développement est le même qu'elle que soit la culture ; pour simplifier, on distingue : (voir figure 1.4)

- Le stade, germination-levée qui va de la germination de l'embryon de la graine à l'émission d'une ou plusieurs racines, puis l'apparition en surface d'une tige (empilement d'entre-nœuds plus ou moins court-noués portant des feuilles et des méristèmes) :
- Le stade végétatif, de durée variable en fonction de la plante et du climat : expansion des organes végétatifs avec accumulation de matière sèche,
- Le stade reproduction : fabrication des futures semences dans lesquelles la matière sèche s'accumulera plus tard (grains...)
- Le stade de remplissage dans les organes qui viennent de se former et qui constitueront la récolte.

Figure 1.4 Les stades de développement du maïs, d'après Hanway, 1966

The development of grain yield in a field stand of sorghum. (Adapted from Fischer, K. S. and Wilson, G. L. 1975. Aust. J. Agric. Res. 26 : 31-41)



Le développement est le parcours de ces étapes : végétatif, puis reproducteur au cours du cycle de la plante ; c'est l'ensemble des modifications qualitatives de la plante correspondant à l'initiation et l'apparition de nouveaux organes ; les différents stades phénologiques sont visuellement repérables sans destruction de la plante, car leurs manifestations sont extérieures.

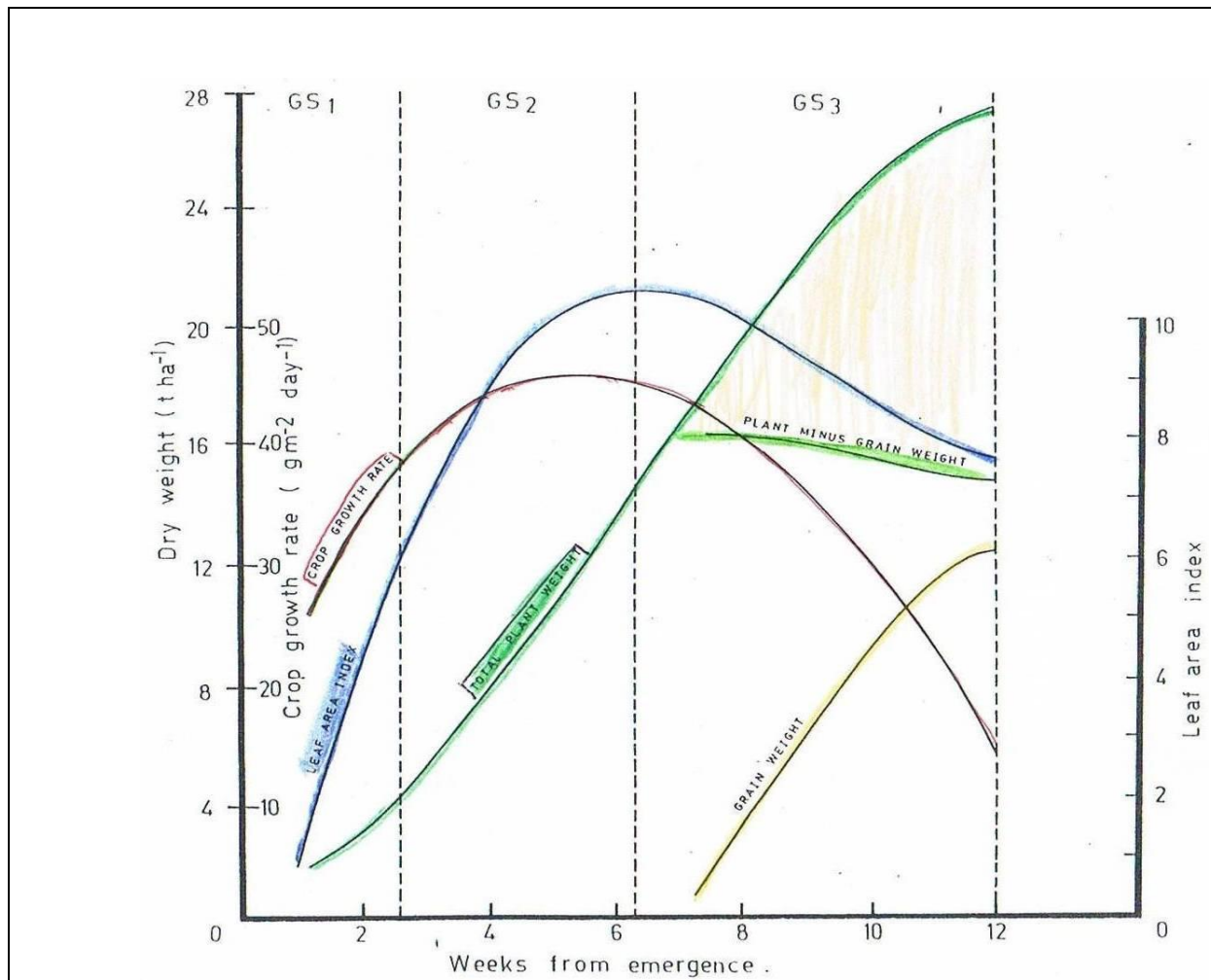
La croissance correspond à l'augmentation des dimensions de la plante ; c'est un phénomène mesurable et qui peut s'exprimer par une vitesse de croissance, pour la hauteur, la quantité de matière sèche... C'est le résultat du bilan entre la synthèse des constituants organiques (photosynthèse à partir de CO_2 et d'eau) et la dégradation par la respiration des différents métabolites (besoins du métabolisme intermédiaire qui aboutit à la fabrication de glucides complexes ainsi que des lipides et protides, en utilisant les éléments minéraux absorbés par les racines).

Assimilation nette = CO_2 de l'air absorbé + éléments minéraux et eau fixée – pertes en O_2 et CO_2 par respiration et excrétion racinaire²

² Pour certaines plantes, les Andropogonées en particulier, elles représenteraient jusqu'à la moitié des éléments synthétisés.

La croissance est liée au développement successif des organes et due à l'action des facteurs nutritionnels sur la taille et le poids de chaque organe. La croissance en matière sèche au cours du cycle dépend aussi de la photosynthèse, donc de la surface et de l'efficacité des feuilles actives.

Figure 1.5 : The development of grain yield in a field stand of sorghum. (Adapted from Fischer, K. S. and Wilson, G. L. 1975. Aust. J. Agric. Res. 26 : 31-41) Extrait de FAO, 1980, « improvement and production of maize, sorghum, and millet », vol 1, plant production and protection N°24



La Figure 1.5 donne pour un sorgho :

La courbe « crop growth rate » (en rouge) du taux instantané de croissance en matière sèche au cours du cycle,

- La courbe « total plant weight (en vert foncé) de la croissance cumulée correspondante en distinguant après la floraison :
- La partie végétative d'une part « plant minus grain weight » (en vert clair) qui baisse légèrement après la floraison
- Les grains de l'autre « grain weight » (en jaune)
- La courbe « leaf area index) (en bleu) d'évolution de l'index de surface foliaire auquel la photosynthèse, donc la croissance en matière sèche, est proportionnelle : on remarque qu'il décroît à partir de la floraison

- Les deux courbes : index de surface foliaire (leaf area index) et rythme de croissance en poids de la plante (crop grow rate) sont très semblables.

1.4 : Retour sur les mobilisations minérales, variation des besoins au cours du cycle.

Le § 1.2 ne traitait que des mobilisations minérales finales en différents éléments, déterminées au moment de la récolte. Le rythme des prélèvements au cours du cycle, dont on va traiter ici, dépend en partie de l'élément considéré et de la culture, mais son allure générale est assez constante, semblable à celle des besoins en eau et à celle de l'accumulation de matière sèche : faible pendant la phase d'installation ; élevée pendant la croissance végétative avec un pic avant la floraison épiaison, elle reste importante en début de maturation. Le « pic » est plus ou moins marqué selon la culture : le maïs est très exigeant en azote lors de sa phase critique : 2,8 kg N /ha/jour pour une production de 4 t de grains /ha, voir tableau 1.3 ci-après, quantité que ne peut libérer la simple minéralisation de la matière organique en trop faible quantité dans les sols de la zone. Il est donc nécessaire de lui apporter de l'azote à ce moment ; c'est valable à un moindre degré pour le sorgho.

Tableau 1.3 : besoins du maïs en N, P, K en kg d'éléments /ha /jour pour une récolte de 4 t de grains (d'après Spies dans IFA , 1972)

Eléments fertilisants				
Période	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
20-30 jours	0.6	0.15	0.6	
30-40 "	2.2	0.50	3.3	
40-50 "	2.8	0.80	4.0	
50-60 "	1.8	0.70	1.5	

Le cas du potassium est particulier, en fin de cycle, la plante restitue au sol une partie non négligeable de ce qu'elle a prélevée auparavant, par excrétion racinaire surtout et en partie par pluvio-lessivage.

1.5 Besoins en eau d'une culture

Ces besoins sont parallèles aux besoins en éléments minéraux qui sont prélevés en même temps ; il n'est pas surprenant qu'ils évoluent de la même façon au cours du cycle de la plante.

Premières notions sur l'évapo-transpiration (ET) :

Un sol nu humide évapore une quantité d'eau qui ne dépend que du climat (température, vent...). Quand le sol est cultivé, s'y ajoute la transpiration des plantes, ainsi l'Evapo-transpiration (ET) correspond aux besoins en eau du champ cultivé.

L'ET dépend du climat, de la culture et de son stade de développement. Une ET de référence dite Evapo-transpiration Potentielle (ETP) a été définie conventionnellement pour donner une valeur indépendante au potentiel d'ET, liée uniquement au climat local, pour chaque période de l'année.

L'Evapo-transpiration Maximale (ETM) d'une culture convenablement alimentée en eau est estimée à partir de l'ETP et d'un coefficient cultural (Kc) défini pour les différents stades de cette culture et qui lui est propre :

$$ETM = Kc \times ETP$$

Au semis, l'ETM se réduit à l'Evaporation du sol nu, évaluée à EVsolnu = 0.35 ETP, puis elle augmente au fur et à mesure de la croissance de la culture, dont la surface foliaire augmente jusqu'à un maximum aux alentours de la floraison-fécondation ; après ce stade dit critique pour la culture (15 jours avant et 15 jours après la floraison pour les céréales) elle

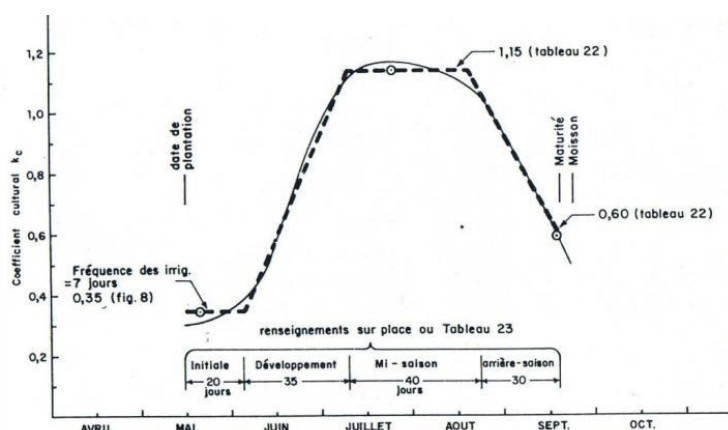
décroit progressivement durant la maturation et la sénescence pour approcher sa valeur de départ.

Pour l'estimation des K_c , on retrouve en général les 4 mêmes phases (définies au § 1.3) de durées variables selon la culture (variété) :

- La phase 1, initiale (germination-levée) quand la surface du sol n'est pas ou peu couverte,
- La phase 2, du développement végétatif jusqu'au moment où le couvert du sol est total.
- La phase 3, de mi-saison (floraison-fécondation) ; besoins maximum, **phase critique**.
- La phase 4, d'arrière saison, du début à la fin de la maturation et la sénescence.

Les valeurs des K_c correspondantes pour le maïs en climat sec sont représentées dans la figure 1.6.

Figure 1.6 : Exemple de courbe des coefficients K_c **pour le maïs** (Extrait de Doorenbos et Pruitt, bulletin N°33 FAO)



La courbe en trait continu représente les besoins instantanés, celle en pointillé donne une approximation simplifiée au cours des 4 phases. Il suffit de connaître les valeurs au palier initial ($0,35 \text{ ETP} = \text{EV sol nu}$), au palier épiaison-fécondation (maximum) et la valeur finale pour qu'il soit possible d'estimer par interpolation toutes les valeurs intermédiaires de K_c en fonction du temps.

Ces 3 valeurs repères concernant les principales cultures sont fournies dans le tableau 1.4. Ces valeurs ne sont qu'indicatives, elles dépendent de la variété et des techniques culturales ; on en trouve diverses estimations dans la littérature sur le sujet, parfois assez différentes en ce qui concerne la période critique. Ces trois valeurs repères concernant les principales cultures sont fournies dans le tableau 1.4. **On trouvera des valeurs des K_c décadaires pour des maïs de trois cycles différents dans le § 1.6.**

Tableau 1.4 : Durée des 4 phases (n en jours) et coefficients culturaux correspondants Kc surlignés en bleu pour différentes cultures (d'après Doorenbos et Pruitt)

Phase durée en jours (n)	Kc	CULTURE					
		maïs 125 j	Sorgho 125 j	Mil 105 j	Coton 180 j	Arach. 130 j	
1° initiale	n	20	20	15	30	25	
	Kc	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	
2° végétatif	n	35	30	25	50	35	
	Kc	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
3° critique	n	40	40	40	55	45	
	Kc	1.05	1.0	1.0	1.05	0.95	
4° sénescence	n	30	30	25	45	25	
	Kc	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	
Récolte	Kc	0.55	0.5	0.35	0.65	0.55	

1.6 : Fiche technique et fiche de culture

La **fiche technique** contient les informations générales sur la culture : botanique, adaptation à divers milieux et zones de culture (écologie), cycles, besoins en eau et éléments minéraux, normes du diagnostic foliaire...

La **fiche de culture** concerne la culture dans une région précise : variétés adaptées, cycle, itinéraire technique (travail du sol, période de semis, densité, doses d'engrais et périodes d'apports, dates et modalités des sarclages, traitements phytosanitaires... Mais en pratique, on constate une certaine confusion entre les 2 termes, ils sont assez communément utilisés l'un pour l'autre !!

Canevas d'une fiche technique pour la culture du maïs :

Le maïs est une des 3 graminées les plus cultivées dans le monde et cela sur tous les continents en climats tempérés et tropicaux dans une gamme de systèmes très large. C'est une des cultures les plus étudiées, les mieux connues ; elle est très sensible aux conditions de fertilité et d'alimentation hydrique et pour cela **une excellente plante test pour les essais de fertilisation**.

Botanique : Zea Mays

Morphologie :

Reproduction :

Variétés et cycles

Croissance et développement : voir figure 1.4 ci-dessus dans le texte.

Mobilisations minérales : valeurs moyennes calculées à partir de l'annexe 1.2 (Piéri Cirad 1989) en kg d'élément par tonne de grains (les données surlignées en vert correspondent aux mobilisations totales dans la partie aérienne, celles qui sont surlignées en jaune correspondent aux exportations par les grains)

Mobilisation minérale en kg d'éléments exportés par tonne de grains produits.					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Mobilisation dans parties aériennes	29,0	8,0	33,0	7,5	7,0
Exportations par les grains	17,0	6,0	6,0	0,8	2,0

On notera la grande importance des pertes en N et cations K, Ca, Mg avec l'enlèvement des pailles

Tableau 1.5 : Besoins en eau : Coefficients Kc décadaires des céréales en culture pluviale de la zone (Source Frère et Popov, 1987, FAO ,1987)

Maïs	Décade													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
100 j	0,3	0,6	0,9	1,1	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,5				
120 j	0,3	0,6	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,5		
140 j	0,3	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5

Valeurs critiques des taux des nutriments dans la feuille opposée sous l'épi à la floraison										
% de matières sèches						Ppm de matières sèches				
N	P	K	Mg	Ca	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B
2.9	0.25	1.9	0.15	0.4	0.15	25	15	15	5	10

Source : Hoefft et Peck, 1991 in Palival.....

Diagnostic foliaire (DF) : Symptômes de carences (avec photos voir CD rom chapitre 1 « carences minérales culture »)

Maladies et parasites : Pour le maïs, on trouve actuellement les meilleures informations au CIMMYT et son antenne IITA pour l' Afrique ; consulter le site internet du CIMMYT : « maize doctor » et ses guides **"identifying production problems in tropical maize, a field guide"** ainsi que "maize diseases » et : "insect pests of maize" .

Exemple de fiche de culture : FICHE DES CULTURES CAS DU MAÏS (ITRAD/FERME DE BEKAO)

Une fiche de culture est nécessairement régionale. Au Tchad, on dispose des fiches ITRAD de la Ferme de Bekao pour la plupart des grandes cultures dont celle du maïs, (variétés du CIMMYT en général). (Voir également annexe 1.3 « fiche technique Maïs IRAD Cameroun »).

Variété adapté : CMS 85-01, CMS 87-04, MEXICAN 17 E,...

Cycle semis-maturité : 90 jours pour CMS 87-04 et 105 à 120 jours CMS 85-01 et MEXICAN

Caractéristiques

- Résistance ou tolérance au striga
- Résistance ou tolérance aux moisissures et aux maladies
- Sols argilo-sableux ou limoneux

Période de semis

- Semer à partir du 1^{er} juin au 25 juin
- Mettre 2 à 3 graines regroupées par poquet
- Ecartement : 0.80m X 0.40m

Entretien de la culture

- Premier sarclage : 10 jours après la levée
- Deuxième sarclage : 3 semaines après la levée

- Démarrage : 15 à 20 jours après la levée, laisser 2 plants les plus vigoureux par poquet.
- Troisième sarclage : 3 semaines après le 2^{ème} sarclage
- Désherbage : arracher le striga au moins une fois avant l'épiaison et une fois après la floraison femelle, désherber à la demande
- Fumure de fond : 5 tonnes/ha de fumure organique avant de labour (terre de parc, fumier, d'étable,...)
- Fumure d'entretien : 10 jours après la levée, enfouir dans les sillons tracés à 10 cm de la ligne des plants, 50 ou 100 kg/ha d'engrais NPKSB : 19-12-19-5-1 ; à l'épiaison mâle, enfouir 100 kg/ha d'urée 46%

Très important :

Pour assurer une levée rapide, bonne et homogène des plants, il faut que :

- 1) Les graines semées soient regroupées dans le poquet et non éparpillées (semis à la volée)
- 2) Le sol soit légèrement tassé sur les graines pour maintenir l'humidité dans le poquet, sinon les graines pourrissent.

Rendement : 2 à 2,5 tonnes/ha

ELEMENTS D'UNE FICHE COTON (COTONTCHAD)

Variété bien déterminée

Labour en culture attelée

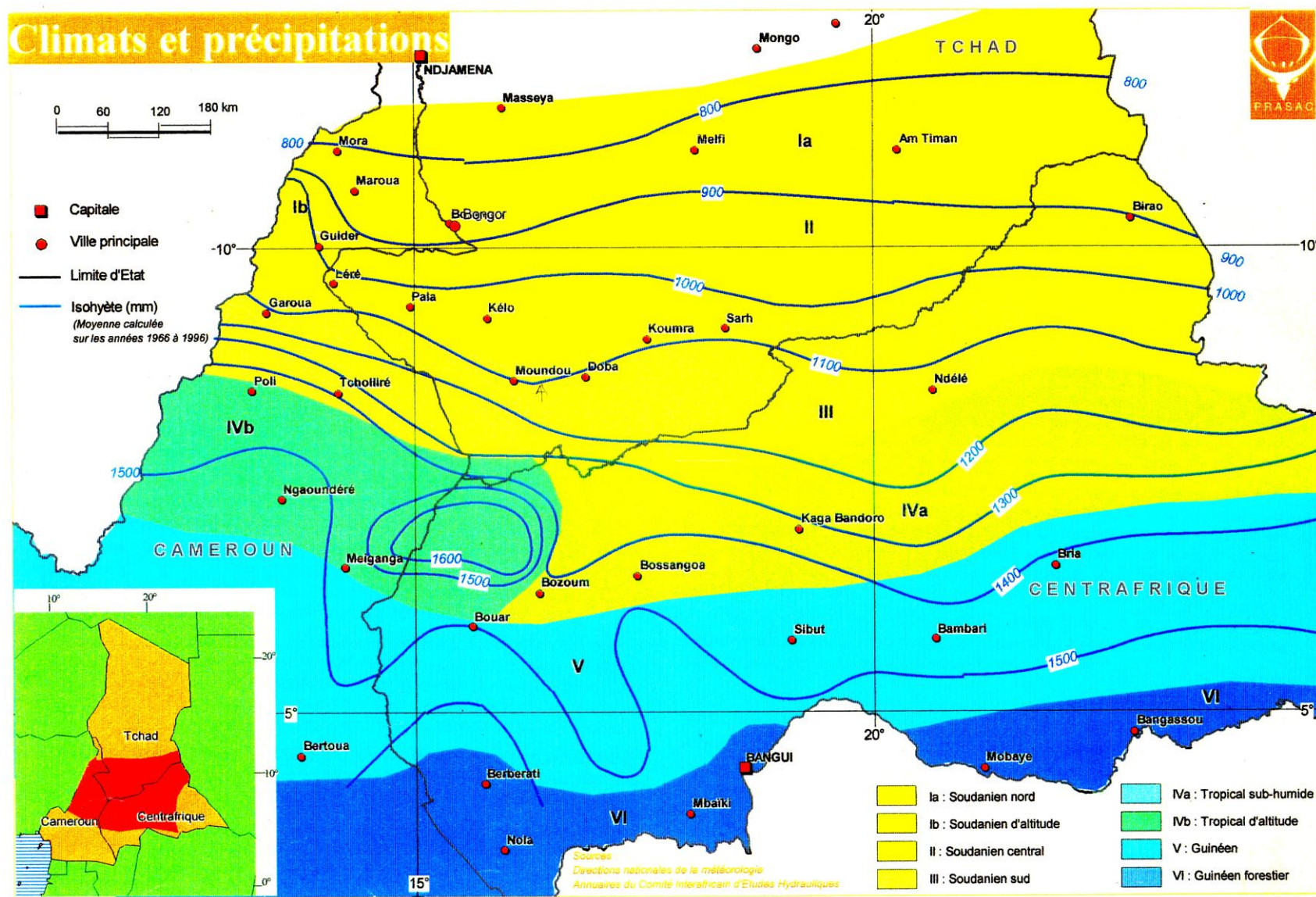
Fumure minérale ; 100 kg/ha de complexe NPKS B (19-12-19-5-1) épandus avant labour en même temps que 3 à 5 tonnes de fumier si possible (très rarement), plus 23 kg/ha d'azote 50kg d'urée apportés à X JAS enfouis par YY.....

Traitements phytosanitaires avec XX et pulvérisateur à dos : au nombre de 5 échelonnés de X à Y

Tous les intrants (semences, engrais, produit phytosanitaire ...) sont avancés au producteur et leur coût déduit au moment de la récolte.

CHAPITRE 2 : LE CLIMAT LES CULTURES ET LES PESTES

Figure 2.1 : Carte des isohyètes de la sous région (source PRASAC)



2.1 Les systèmes et le climat.

2.1.1 Relations entre systèmes et climats

Le terme système suppose un ensemble plus ou moins complexe d'opérations logiquement coordonnées pour atteindre un certain objectif. Un système de culture à l'échelle du champ, est emboîté dans un système de production à l'échelle de toutes les activités d'une exploitation, lui-même emboîté dans un système agraire à l'échelle d'un petit terroir et de ses différentes exploitations. Ces derniers sont encore imbriqués dans un ensemble régional plus vaste, caractérisé par une plus ou moins bonne ouverture sur les marchés extérieurs, un réseau de communication plus ou moins développé, des services d'appui à la production etc....

Les systèmes agraires du Tchad sont caractérisés par l'opposition très marquée, entre les 2 grands systèmes de production :

- dans les régions nord, à climat sahélien et sahélo-sahélien : l'élevage, essentiellement nomade, avec une tendance à se déplacer vers le sud, accompagné de quelques cultures adaptées à la sécheresse comme le mil.

- dans le sud, à climat soudanien, l'agriculture -sans tradition d'élevage bovin associé- sauf à la frontière du Cameroun.

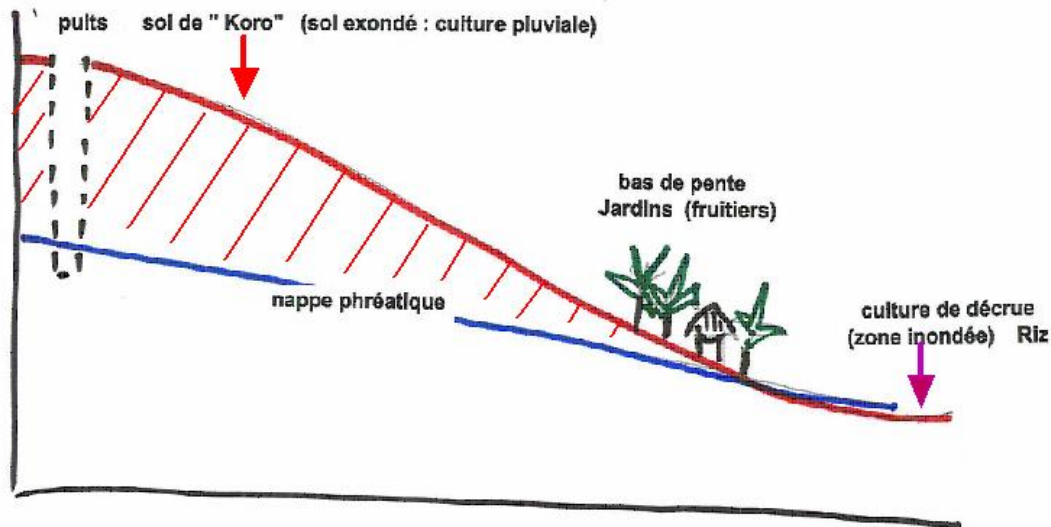
On ne traitera à titre d'exemple que de la zone soudanienne.

Les systèmes de production agricole y sont presque exclusivement basés sur les productions végétales. Le nombre d'exploitations avec attelages de bœufs est très inférieur au nombre de celles qui ont une charrue ; mais la culture attelée est présente dans chaque village et la quasi totalité des parcelles cotonnières seraient « labourées » ainsi que le tiers des parcelles vivrières. Une part non négligeable des parcelles vivrières ne seraient pas labourées (en particulier derrière coton).

Les systèmes de culture ; on en distingue deux liés à leur position topographique :

Figure 2.2 : la chaîne des sols (voir également § 3.1)

chaîne des sols & alimentation hydrique



Les systèmes strictement pluviaux, sur les parties hautes du paysage, comme les koros au sud du Tchad, en principe bien drainés, mais en fait pas toujours,

Les systèmes de plaines et de bas de pentes, saisonnièrement submergées : rizicultures inondées sans guère de contrôle de l'eau et sorghos de décrue (Berbéré).

Les deux peuvent coexister dans un système d'exploitation aux calendriers culturels assez complexes. On ne traitera ici à titre d'exemple que des systèmes de culture pluviaux et plus particulièrement celui basé sur le coton en alternance avec une céréale.

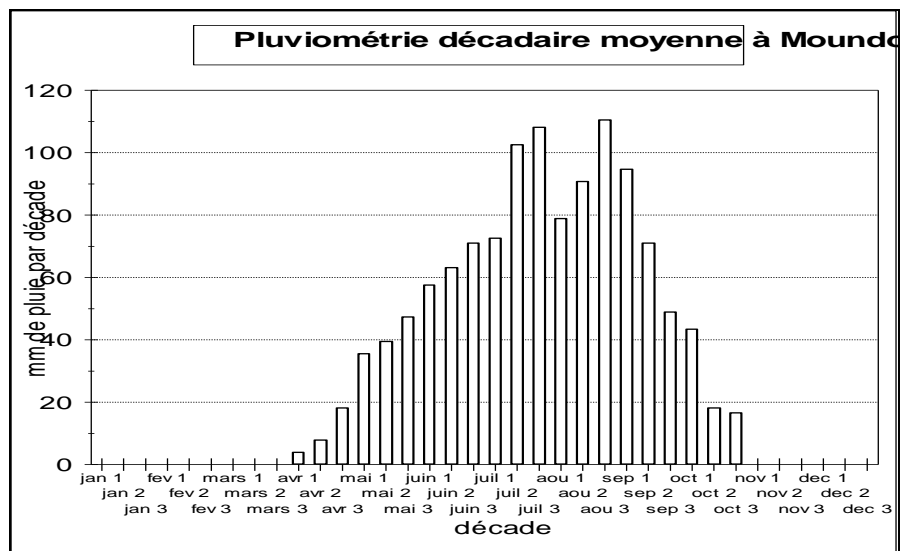
2.1.2 Le climat du sud du Tchad

Le climat soudanien du Sud du Tchad est intermédiaire entre les climats équatoriaux des régions forestières méridionales et sahéliens au Nord (carte page ci-dessus, où l'on note que Moundou et Garoua où se poursuit une recherche agronomique de grande qualité, sont sur la même isohyète).

La pluviosité, élément déterminant de la production agricole à ces latitudes, est de l'ordre de 1100 mm par an répartis en 5 à 7 mois de mai à octobre (climat soudanien), avec un gradient Nord Sud : du régime Soudano-sahélien à 5 mois de pluie (et 900-1000 mm) dans la frange septentrionale au régime Soudano-guinéen à 6-7 mois pluvieux (et 1200 mm) vers la frontière avec la RCA.

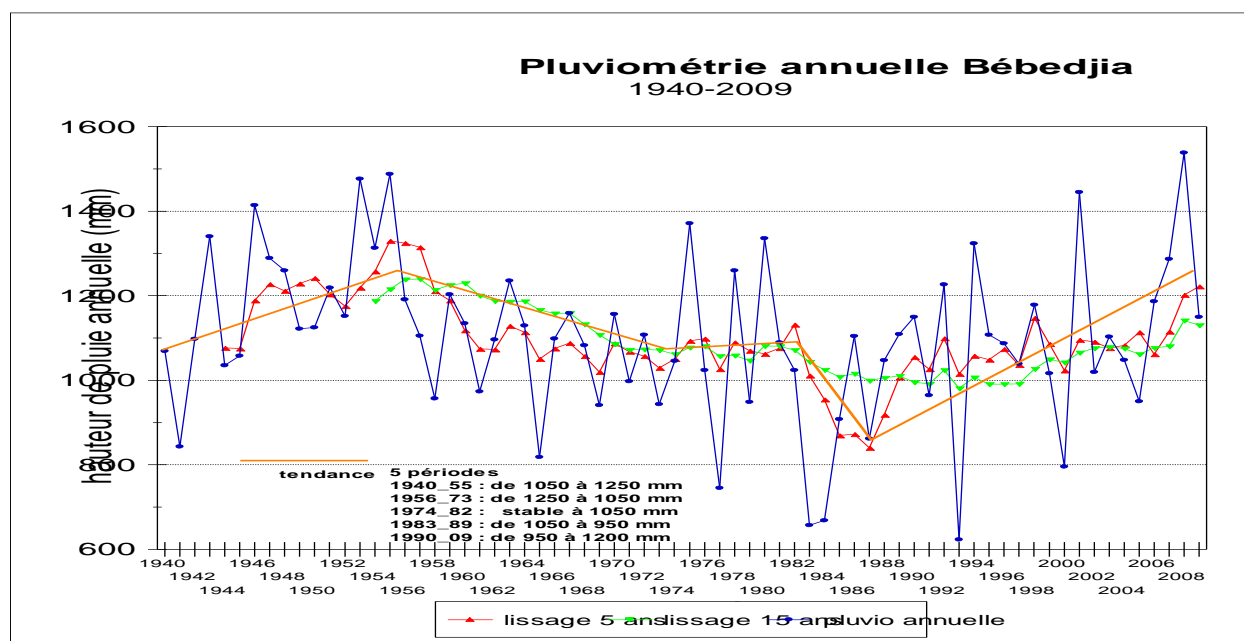
La pluviométrie moyenne de Moundou, entre 1980 et 1999, présente déjà deux pics de pluviosité, avec un léger creux pendant les 2 premières semaines d'août³, propres aux régions à deux saisons des pluies (distribution bimodale) des zones plus méridionales.

Figure 2.3 : pluviométrie décadaire moyenne à Moundou période 1980-1999



Comme dans toutes les régions soudaniennes, la pluviosité est extrêmement variable d'une année à l'autre en quantité, hauteurs annuelles (Figure 2.4) et mensuelles, et par sa répartition dans la saison ce qui ne pose vraiment de problèmes que dans la partie nord, soudano-sahélienne, moins arrosée.

Figure 2.4 : Pluviométrie annuelle de Bébédjia sur 70 ans



³ mais trop peu marqué et irrégulier pour que l'on puisse parler de véritable « petite saison sèche » ; c'est du moins un signe de proximité du régime de pluies équatorial.

C'est surtout le début de la saison des pluies qui est peu prévisible et qui, s'il est trop tardif, peut le plus fortement défavoriser les cultures annuelles. La date de fin des pluies est moins irrégulière : d'où l'intérêt des variétés de sorgho photopériodiques nombreuses parmi les variétés locales.

Il faut aussi « compter » avec des épisodes de sécheresses plus ou moins longs (5 à 20-25 jours). Ces épisodes de sécheresse ne seront vraiment dangereux dans la partie sud, soudano-guinéenne, que si les réserves hydriques du sol y sont faibles pour une raison ou une autre (profondeur d'enracinement insuffisante, etc.) car globalement les précipitations dans la zone Moundou-Bébedjia sont, comme on le verra plus loin, largement supérieures aux besoins en eau des cultures ; l'excédant important doit être évacué par ruissellement et drainage ; on y reviendra...

2.1.3 : CALENDRIER AGRICOLE de la zone

La campagne agricole débute en avril et se termine fin mars. Les travaux commencent par le débroussement de la sole d'ouverture qui est généralement le coton ou le sésame. La préparation du sol est effectuée en général, soit à la charrue pour la plupart des champs de coton et quelques parcelles de vivriers, soit à la houe. Ces travaux ne peuvent se réaliser qu'après des pluies suffisantes. Parfois, faute de temps et surtout si les pluies sont tardives, les semis sont réalisés sans préparation du sol. Dans ce cas, le premier sarclage est très important et très pénible. Cette diversité conduira l'expérimentateur sur la fertilité à faire des choix sur les techniques de préparation à retenir dans ses essais. Un essai- démonstration recoupant fumure et préparation du sol peut être envisagé en station (dispositif en bandes croisées § 5.4.2, 2^{ème} partie)

Les semis ont généralement lieu en avril-mai en commençant par le sorgho et le mil, puis l'arachide et le coton.

Les récoltes commencent en août avec les premiers sorghos, alors que les sorghos tardifs vont jusqu'en novembre. L'arachide aussi s'étale plus ou moins, mais est généralement récoltée en octobre. La récolte de coton se déroule de novembre à janvier.

2.1.4 : Les systèmes basés sur le coton

Les composantes de la culture du coton ont été mises au point par l'IRCT à Bébedjia, en relation avec le développement : sélection variétale, techniques culturales, fumure minérale (rappel : 100 kg/ha de NPKSB soit : 19-12-19-5-1 + 50 kg/ha d'urée) et si possible organo-minérale en complément de la fumure minérale par l'enfouissement de 5 t/ha de fumier, produits de traitements contre les parasites La société d'encadrement : la COTONTCHAD qui contrôlait (du temps où elle fonctionnait) toute la filière avançait tous les intrants aux paysans (le coût en était retenu sur la valeur de la récolte dont le ramassage était aussi assuré par la COTONTCHAD). Il était recommandé de cultiver derrière le coton une céréale : maïs ou sorgho ne recevant que de l'urée (50 ou 100kg/ha à la montaison) ; l'alternance coton céréale étant interrompue par des jachères de longueur variant avec la disponibilité en terres.

Avec le développement de la culture du coton, la culture attelée a commencé à être introduite à la fin des années 1950, mais a eu beaucoup de mal à s'implanter. Le nombre d'exploitations équipées de bœufs de trait, avec les vaches nécessaires pour les reproduire,

ainsi que de l'équipement associé, en particulier les charrettes⁴, est très en retard par rapport aux pays voisins. La traction bovine permet une meilleure préparation des sols et des semis plus précoces, tout en diminuant la pénibilité du travail, mais il faut que les travaux soient effectués à temps. Or, faute d'attelages, le travail à l'entreprise tient donc une place particulièrement importante en ce qui concerne le « labour », avec les conséquences habituelles sur la qualité du travail et le retard dans son exécution, dont le recul des dates de semis particulièrement défavorable en zones soudanienne. En fait, ce labour se réduit à une sorte de grattage superficiel avant semis, en pratique une sorte de désherbage destiné à faire gagner du temps sur le 1er sarclage.

Par ailleurs, les consignes de fumure n'étaient que partiellement suivies : pas de fumure organique faute de fumier, fumure minérale à dose réduite par rapport aux conseils vulgarisés. De plus, la formule recommandée n'a pas été actualisée depuis longtemps. Enfin les terres se sont mises à manquer pour mettre les champs en jachère, méthode ancestrale d'entretien de la fertilité.

Répété de façon continue, ce système a entraîné l'épuisement actuel de nombreux sols, il sera pris comme exemple et comme support pédagogique pour LE CALCUL DES BILANS MINERAUX dans le prochain chapitre.

Dès 2001, la situation n'avait fait qu'empirer, on savait que 50 % des surfaces cultivées en coton ne recevaient aucun intrant (ni engrais, ni traitement phytosanitaire) et que les intrants reçus en « productivité » étaient bien inférieurs aux normes préconisées. Des études menées en 2008 concernant le respect des itinéraires techniques sur coton dans 3 sites de pré-vulgarisation donnent :

Rendement moyen en coton-graines en kg/ha (source IRAG Bébédjia, Ledjambo 2008)		
ITK	Paysans pilotes	Pratiques paysannes
1385	1058	575

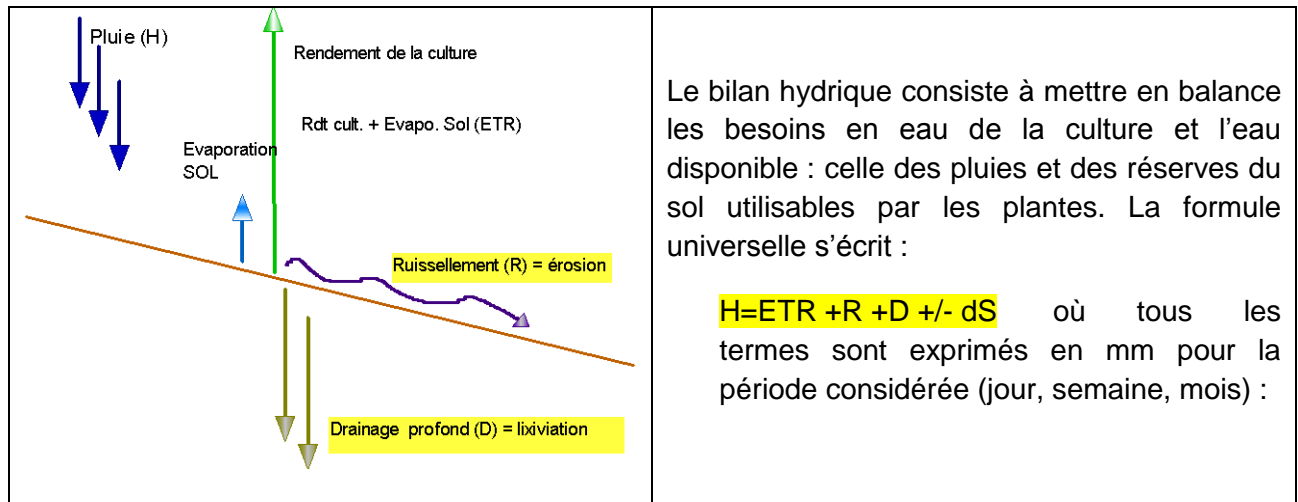
En 2009, la situation de la filière coton était catastrophique et sa culture en bonne partie abandonnée.

⁴ alors que le transport (bœufs et charrettes) est d'ordinaire la 1ère étape de la mécanisation)

2.2 Bilans hydriques, indices de satisfaction des besoins en eau de la culture

2.2.1 Les termes du bilan hydrique

Figure 2.5 Les termes du bilan hydrique (d'après F.N. Reyniers CIRAD 1995)



H=hauteur des pluies

ETR=évapotranspiration réelle de la culture, elle est égale au maximum à ETM, avec $ETM = K_c \times ETP$, quand il y a assez d'eau disponible (voir encadré ci-dessous), sinon elle se limite à l'eau restante dans la réserve du sol.

R=ruissellement : source de l'érosion sélective des éléments fins (argile, humus)

D=drainage en profondeur hors de portée de la culture, une fois la réserve utile du sol saturée, source de pertes en nutriments en solution par lixiviation.

dS=variations du stock d'eau du sol, le maximum est la réserve utile (RU) pour la plante.

2.2.2 : mesure de l'ETP et des Kc

On a vu au 1^{er} chapitre que la demande en évapotranspiration d'une culture pouvait être évaluée à partir d'une évapotranspiration de référence du lieu : l'ETP et de coefficients culturaux : Kc propres à la plante et à son stade de développement.

Les ETM comme les ETP ont été mesurées dans des cases lysimétriques pour chaque grande zone climatique, ce qui est une opération délicate et coûteuse ; les coefficients culturaux résultent simplement du rapport des deux mesures effectuées en un même lieu à la même période : pour une végétation standard (un gazon de graminée maintenu court) et pour la culture considérée.

Ces coefficients sont en principe des constantes indépendantes de la région. L'ETM varie avec l'ETP qui, elle, dépend des conditions climatiques de l'année pour chaque période, en particulier de la température de l'air. Les spécialistes de l'agro-climatologie ont mis au point diverses formules d'estimation de l'ETP à partir des relevés habituels en station

météo : températures maximum et minimum, humidité de l'air, parcours du vent, etc...pour qu'il ne faille pas mesurer chaque année cette ETP. La formule de Penman est actuellement adoptée.

Les stations agro-météorologiques, comme celle de Bébédjia, comportent également des bacs d'évaporation (le bac type A étant le standard) ; on considère que l'évaporation journalière dans ces bacs et l'ETP sont proportionnelles, on peut donc estimer l'ETM à partir de cette évaporation et de coefficients K_{bac} différents des K_c , ces coefficients sont disponibles dans des ouvrages spécialisés.

2.2.3 : Exemple de Moundou : inconvénients des excédents de pluviosité

A titre d'exemple on a représenté dans la figure 2.6 une esquisse de bilan hydrique mensuel moyen 1980-1999 à Moundou, en donnant, pour simplifier, la valeur¹ à tous les K_c :

Dans cet histogramme :

La pluviométrie est représentée :

- Par les seuls rectangles verts quand elle est inférieure à l'ETP (mars, avril, mai, octobre et novembre)

- Par la somme des rectangles verts et bleus (en-dessous) quand la pluviométrie est supérieure à l'ETP (juin, juillet, août, septembre) ; dans ce cas les rectangles bleus représentent l'excédent des pluies qui doit être évacuée par ruissellement et/ou drainage.⁵

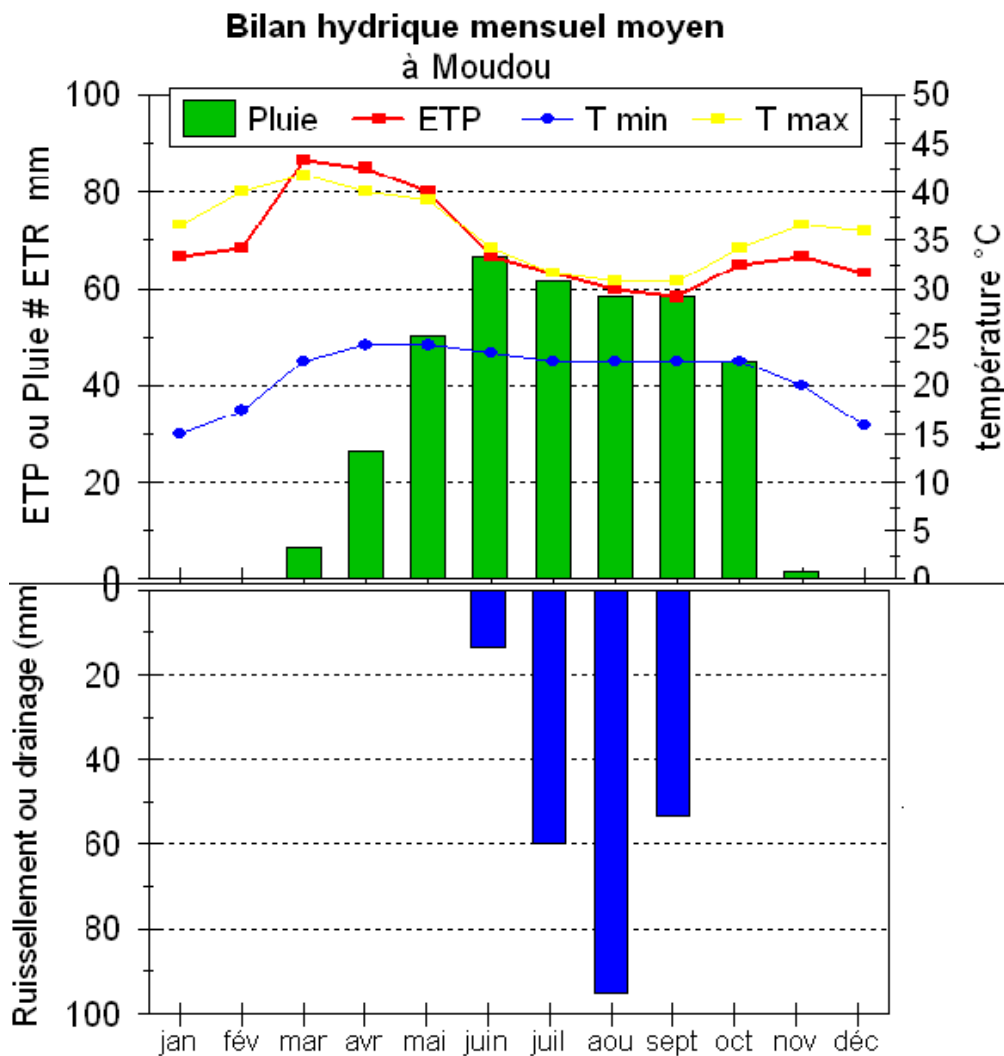
L'ETP mensuelle, que l'on assimilera ici à une ETM, est représentée par les rectangles blancs surmontés d'un trait rouge.

On voit combien cet excédent est préoccupant de juillet à septembre inclus : pour une pluviométrie moyenne de 846 mm de juin à septembre, l'excédent qui doit être évacué par ruissellement et drainage est de 436 mm soit plus de la moitié !

Si leur somme : $R+D = H - ETR(\text{ici ETM}) +/ - dS$ est évidente, il est difficile d'évaluer la part de l'un et de l'autre quand on ne dispose ni de parcelles d'érosion, ni de lysimètres. On peut en approcher en essayant d'estimer d'abord la valeur du ruissellement et par différence, la valeur du drainage. Les calculs concernant le ruissellement nécessitent des informations détaillées sur l'intensité des pluies, la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol à différents niveaux d'humidité, la pente, l'état de surface et le couvert végétal du sol...etc, très rarement disponibles.

⁵ Le ruissellement commence au moment où l'intensité de la pluie est supérieure à la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol (les deux exprimées avec la même unité, mm/heure par exemple).

Figure 2.6 : Moundou : bilan hydrique mensuel moyen 1980-1999



Le souci du maintien de la fertilité des sols implique celui préalable du contrôle de l'érosion : fertiliser un sol dont on laisse perdre les éléments les plus riches, à savoir les argiles et la matière organique par érosion différentielle, n'a pas de sens. Il faudrait ici tout un exposé sur les techniques antiérosives qui pourraient faire l'objet d'un atelier à lui seul. Disons simplement que le contrôle de l'érosion ne veut pas dire la suppression complète du ruissellement, qui d'ailleurs en cas d'excès de pluie se ferait nécessairement au profit du drainage profond ! Il convient simplement de le ralentir et de filtrer, c'est-à-dire de bloquer les particules en suspension par des obstacles disposés en courbe de niveau (rangées de pierres ou de graminées pérennes).

Les conséquences de la percolation en profondeur de grandes quantités d'eau, moins visibles, donc moins évidentes, sont pourtant graves.

Les ions les plus solubles dans l'eau du sol, à laquelle la plante s'alimente, sont dans les «systèmes conventionnels» entraînés irréversiblement hors de portée des systèmes racinaires des cultures, en particulier le principal anion : l'azote nitrique (NO_3^- , nutriment essentiel de la culture qui entraîne avec lui de préférence les cations bivalents Ca^{++} et Mg^{++} ,

puis le potassium K^+ . Il en résultera des déficiences en tous ces éléments et une acidification excessive du sol. C'est ce qui se passe dans la région de Bébédjia (voir CD rom chapitre 3 : illustration du thème dans le document J.Gigou « acidification des sols »)

Des logiciels de simulation des bilans hydriques de plus en plus sophistiqués, intégrant ces calculs ont été mis au point, notamment par le CIRAD et par la FAO⁶. Il faut y introduire un certain nombre de paramètres (telles la vitesse d'infiltration de l'eau, celle de la croissance en profondeur du système racinaire de la culture ...rarement disponibles ; cela pour une précision un peu illusoire et non indispensable aux expérimentateurs pour juger de la situation. Ils ont en outre l'inconvénient, à notre avis, de dispenser les chercheurs de calculer et comprendre ce qui a vraiment lieu ; c'est un risque propre à l'automatisation des processus et des calculs ; on le retrouvera à propos des interprétations statistiques des résultats d'essais.

Pour comprendre l'influence de la pluviosité de l'année sur les rendements d'un essai, un modèle compliqué n'est pas nécessaire ; la FAO (Frère et Popov, 1987) en a proposé une forme très simple et pratique tenant sur une seule feuille que l'on peut remplir manuellement⁷ en cours de saison – voir le modèle en vis-à-vis rempli avec les données de Moundou. La méthode consiste à mettre en balance, décade par décade, la Pluviométrie observée (Po, colonne 4) et les Réserves en eau du sol (Rés : colonne 10) aux Besoins en Eau de la culture ($BE = K_c \times ETP$, colonnes 6, 7 et 8) ; la différence Po-BE (colonne 9) selon qu'elle est négative ou positive implique la décharge ou la recharge de la réserve en eau du sol (entre zéro et son maximum : la capacité de rétention en eau utilisable par la plante) ; les Surplus ou Déficit quand la réserve est saturée ou épuisée sont reportés dans la 11^{ème} colonne (S/D). L'index (de satisfaction des besoins en eau) donné dans la 12^{ème} colonne est égal, tant qu'il n'y a pas de déficit à 100. Dès qu'apparaît un déficit, l'index est diminué en % du rapport de ce déficit aux besoins de la culture depuis le semis jusqu' à ce moment. La valeur de l'index ne peut remonter, elle ne peut que diminuer au fur et à mesure des éventuels déficits décadaires ; sa valeur finale à la récolte traduit le déficit d'alimentation en eau global au cours du cycle. Ainsi, on peut considérer qu'à un index de 100 correspond le rendement potentiel des cultures, estimé d'après les meilleurs rendements observés localement, dans les limites de la satisfaction de leurs besoins en eau et nutriments. De nombreuses mesures et observations de terrain analysées par la FAO ont montré d'excellentes corrélations entre l'index et les rendements des cultures. La relation précise entre les rendements et l'index pour une culture donnée dans un système donné ne peut s'obtenir que si l'on dispose de nombreux résultats d'essais sur plusieurs années. Le CIRAD (F.Forest et F.Reyniers, 1985) a cherché une amélioration de cet index global en le corrigeant par l'index de la satisfaction en eau pendant la période critique ; le nouvel indicateur s'exprime en mm et non en %. En simplifiant

$$IRESP = ETR_{cycle} \times (ETR/ETM)_{phase\ critique}$$

⁶ Voir : document FAO n° 56 sur internet

⁷ Le modèle est aussi disponible sous forme de programme informatique élémentaire ; il est aussi rapide et plus éclairant de procéder à la main en suivant de décade en décade l'évolution du bilan hydrique.

Tableau 2.1 : formulaire FAO rempli avec la pluviométrie (moyenne 1980-1999) et l'ETP moyenne (fournie par recueil FAO) de Moundou pour un sorgho de 130 jours semé vers le 21 mai.

SUIVI AGROMETEOROLOGIQUE DES CULTURES PLUVIALES – formulaires 01												
STATION : Moundou					PAYS :				SAISON : moy 1980-99			
LAT.		LONG.		ALT.		C.VAR : maïs		Cycle.140 j				
CAPAC RET. EAU 100					mm		B.E. Totaux culture 504			mm		
N°	DEC	Pn	Po	nj	ETP	Kc	BE	Po-BE	Rés.	S/D	Index	NOTES
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	1/5		20		56							
	2/5		29		55				15			
1	3/5		35		54	0.3	16	19	34		100	semis
2	1/6		44		52	0.6	31	13	47		100	
3	2/6		48		50	0.8	40	8	55		100	
4	3/6		59		50	0.9	45	14	69		100	
5	1/7		60		44	1.0	44	16	85		100	
6	2/7		88		43	1.1	47	41	100	26	100	Voir figure 2.3 p.17
7	3/7		93		41	1.2	49	44	100	44	100	
8	1/8		74		41	1.2	49	25	100	25	100	
9	2/8		85		40	1.1	44	41	100	41	100	
10	3/8		103		39	1.0	39	64	100	64	100	
11	1/9		81		39	0.8	31	50	100	50	100	
12	2/9		66		39	0.7	27	29	100	29	100	
13	3/9		45		38	0.6	23	22	100	22	100	
14	1/10		31		38	0.5	19	12	100	12	100	récolte
	2/10		16		38				100			Excédent : 313 mm
	3/10		14		37							
Total pluvio :			991 mm									

Voir CD rom chapitre 2 « Calcul bilan hydrique FAO » sur tableur)

Les relations entre indicateur et productivité ont été réalisées pour le maïs, le mil et l'arachide, avec des techniques et des situations pédoclimatiques variées. L'équation des rendements s'établit ainsi : $Rdt = a \text{ IRESP} + b \dots$ dans chaque type d'agro-système agricole, les paramètres a et b sont à définir (F.Reyniers, 1995).

A titre d'exemple, et pour donner une image plus claire du climat local, le formulaire FAO (Tableau 2.1) a été rempli avec les données climatiques de Moundou : pluviométrie et ETP moyennes pour une culture de sorgho de cycle 130 jours, coefficients Kc du tableau 1.5, culture semée le 21 mai.

Le résultat est éclairant : en moyenne, les 1ères pluies, début mai, permettraient de semer vers le 15 ou le 20 de ce mois ; ensuite, la pluviosité est toujours supérieure aux besoins de la culture, les besoins en eau sont toujours satisfaits et l'index final est encore égal à 100. La capacité au champ de 100 mm est saturée avant la fin du mois de juin ; alors les précipitations en juillet, août et même septembre largement excédentaires génèrent un ruissellement et/ ou un drainage très importants : 436 mm pendant la culture, soit équivalent à la moitié de la pluviométrie observée pendant la même période ! sans tenir compte des excédents des trois décades suivantes! Si, comme il est recommandé, le ruissellement est limité, ou mieux supprimé, le drainage en profondeur, et les pertes par lixiviation que l'on peut craindre en conséquence, sont encore plus élevées.

Il est évident que l'on obtiendra des chiffres très inférieurs de ruissellement/drainage si l'on traite les données pluviométriques des années les plus sèches, comme 1963 et 1964 ou 1993, (voir figure 2.4). Ils seront au contraire encore supérieurs pour des années telles que 2001 ou 2007. La situation moyenne reste la plus représentative.

C'est une contrainte que l'on peut être alors tenté de gérer par des systèmes appropriés basés sur le modèle de la jachère longue durée comme :

2.2.4 : Les solutions envisageables.

En agriculture conventionnelle, la seule mesure pour minorer ces pertes consiste à cultiver des plantes à enracinement puissant, profond, et des variétés de cycle proche de la longueur de la saison des pluies, puis de réussir un semis précoce et un démarrage rapide, vigoureux de la végétation. Un système racinaire efficace alimentant une forte demande des parties aériennes fera office de filtre en prélevant le maximum de nutriments au passage de l'eau percolant en profondeur pour ne laisser passer que des solutions appauvries. C'est ce qui a lieu comme on l'a vu dans les jachères de longue durée. Peut-on rêver d'une culture à enracinement très puissant comme les Andropogonées et de plus productive ? C'est le cas du mil, mais ses rendements sont médiocres.

Les cultures en couloir naguère cheval de bataille de l'IITA et les SCV s'inspirent du fonctionnement des jachères. Ici aussi, il faudrait un long chapitre ou mieux un autre atelier pour traiter le sujet. Cependant, les principes d'expérimentation sur les fumures n'y sont pas différents.

La solution culture en couloir a été prônée par l'IITA, il y a une vingtaine d'années, s'est avérée inapplicable, inopérante ; elle est abandonnée.

Les SCV sont bien difficiles à maîtriser et à faire adopter comme le montre l'échec complet du très récent programme dans la région, mais l'expérience se poursuit au Nord

Cameroun avec des résultats prometteurs sur le plan technique, mais des difficultés d'adoption d'ordre surtout pratique (coexistence de l'élevage itinérant). Les cultures en couloirs ont été abandonnées, mais pour les SCV l'expérience continue ; la plus voisine et la plus avancée dans ce domaine en zone soudanienne se poursuit au Nord Cameroun. Cette expérience devrait être observée de près par les chercheurs et développeurs tchadiens.

2.3 Les « pestes »

2.3.1 Maladies et parasites (*pour mémoire*):

C'est l'affaire d'un indispensable spécialiste de la « défense des cultures » dans une équipe régionale. En règle générale d'ailleurs, les traitements phytosanitaires des cultures vivrières ne sont pas envisagés, car trop coûteux ; les Instituts internationaux se sont tournés vers la sélection de variétés résistantes et parfois vers la lutte biologique dans le cas des parasites. Seul, le traitement des semences avec un mélange insecticide + fongicide est préconisé.

2.3.2 Mauvaises herbes :

Ce serait aussi l'affaire d'un spécialiste, mais la malherbologie n'est pas considérée comme une priorité ; les malherbologistes sont rares, c'est donc à l'agronome de s'occuper de la question. Plus que les maladies et les parasites, on peut considérer les mauvaises herbes comme une composante de la fertilité : l'infestation du sol par des graines d'adventices ou pire de plantes parasites comme le striga est aussi pénalisant pour les rendements qu'un manque de fertilité chimique. C'est heureusement plus facile à gérer. Avec la disparition des jachères, le contrôle des adventices est devenu la tâche la plus lourde du calendrier cultural : les sarclages manuels représenteraient 40 à 70 % des temps de travaux (O. Hauswirth et M. Naitormbaïdé, 2004)

Une fois encore, c'est un sujet trop long pour être traité ici, qui demanderait un autre atelier à lui seul. cf celui de Marnotte en 1999 (Prasac).

La synthèse des acquis sur la connaissance du milieu physique et humain ainsi que des résultats de la Recherche à ce jour restent à faire, ce devrait être une priorité. Une étude systématique et approfondie des expériences (culture du coton, SCV...) qui se poursuivent au Nord Cameroun, sans être interrompues par des troubles politiques, paraît la source de transfert de résultats la plus intéressante.

CHAPITRE 3 - FERTILITE DES SOLS

Sols exondés, bilans minéraux des cultures et fertilisation en zone soudanienne.

3.1 Les sols : profil pédologique et chaîne des sols.

Il s'agit de rappels sur des notions que doivent déjà connaître tout technicien agricole, à fortiori les agronomes.

Un sol agricole est le réservoir d'eau et de nutriments pour la culture. C'est un milieu très complexe, mélange de particules minérales de diamètres très variables, de matières organiques plus ou moins évoluées, poreux, et donc permettant la circulation de l'air et de l'eau et qui abrite une multitude d'organismes vivants, des micro-organismes pour l'essentiel (bactéries, champignons), d'insectes et de végétaux ; je ne sais plus qui a dit de façon très imagée « **le sol est l'intermédiaire entre la roche et la vie** ».

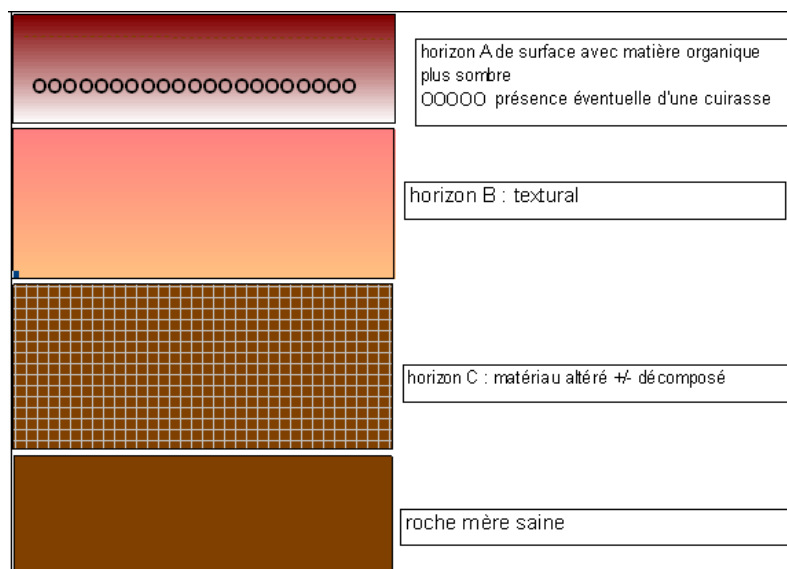
Bref rappel des étapes de la formation d'un sol :

Géologie : formation et minéralogie de la roche mère.

Altération et désagrégation de la **roche mère** par les eaux de pluies et les organismes végétaux primitifs (lichens, mousses) ; dissolution des minéraux qui la composent, (silice, feldspath...) ; passage de la roche saine à la roche altérée (altérite), puis, avec l'apparition des végétaux plus évolués et d'une microfaune, **passage au sol proprement dit** avec ses composants minéraux (sables, limons, argiles), ses matières organiques et ses innombrables organismes vivants.

Figure 3-1 : superposition des horizons du sol, profil pédologique ;

Profils avec horizons pédologiques



On appelle horizons utiles ou horizons agricoles la partie du profil exploitable par les racines des cultures ou des jachères ; on en fait une description particulière qui doit être un préalable à l'expérimentation : le profil cultural

(voir CD rom chapitre 3 « Fiche descriptive du profil cultural »)

Un sol comprend un certain nombre de couches superposées depuis la roche mère jusqu'à l'horizon humifère en surface ; les pédologues décrivent l'ensemble : **le profil pédologique** avec une terminologie spécifique (liée à la place des horizons dans la genèse

du sol), terminologie qu'il serait souhaitable de mieux connaître par les agronomes (voir figure 3.1).

On appelle **profil cultural**, un profil de sol cultivé limité à la couche exploitable par le système racinaire standard des cultures ; ou par la profondeur du système racinaire en place quand il est limité par une « barrière naturelle quelconque (comme une cuirasse de latérite, une nappe phréatique, un accroissement exagéré de l'acidité du sol...). L'accent est mis sur la quantité et la qualité de la matière organique et des argiles avec la profondeur, la structure et les porosités de différents ordres. La description du système racinaire en cours de culture en est l'objet principal. Ses anomalies et les obstacles qui s'opposent éventuellement à son développement permettent en général le diagnostic des causes d'insuccès d'une culture. (voir CD rom chapitre 3 « Fiche descriptive du profil cultural »).

Chaque horizon a sa propre composition : taux de matière organique, taux d'argile, vie animale (macro et microfaune) et végétale (macro - représentée par les racines - et microflore), ses réserves en éléments minéraux ...La nature plus ou moins nette des transitions entre horizons est importante. Une transition brutale : la présence de la nappe phréatique, d'une cuirasse ou soit de taux de matière organique ou d'argile importants est en général la limite plus ou moins étanche pour l'enracinement des plantes, tant sous végétation naturelle que sous culture.

On appelle **horizons utiles ou horizons agricoles**, la partie du profil exploitable par les racines des cultures ou des jachères. Les descriptions doivent s'accompagner de prélèvements d'échantillons représentatifs de chaque horizon pour analyses physiques et chimiques.

3.2 : Caractéristiques physiques et chimiques des sols.

Un sol agricole est caractérisé par ses propriétés physiques : texture (composition : granulométrie, matière organique) et structure (agencement) de ses différents horizons.

3.2.1 : Caractéristiques physiques et capacité d'échange des constituants.

Texture : elle comprend des éléments minéraux pour l'essentiel et la matière organique en quantité relativement faible, mais dont l'importance est capitale pour la fertilité des sols. On distingue dans les particules minérales, selon leurs dimensions (granulométrie) : l'argile (diamètre $<2\mu$), les limons (diamètre $<20\mu$), les sables (diamètre $<20000\mu$) en distinguant les sables très fins ($d < 50\mu$), les sables fins ($d < 200\mu$) et les sables grossiers ($d < 2000\mu$). On définit en fonction des proportions des différentes particules dans la fraction minérale des sols : les sols « argileux », « argilo-sableux », « argilo-limoneux » « sableux ». On peut y trouver en supplément des éléments plus grossiers, gravillons, débris de cuirasses, pierres ...

Le terme d'argile est ambigu, car il **désigne également les différentes formes minéralogiques de ces particules**, n'ayant pas les mêmes propriétés physico-chimiques. Ce sont des silicates d'alumine plus ou moins complexes possédant (on anticipe un peu sur le prochain §) **des capacités d'échange cationique (CEC) différentes**. La CEC est une propriété des éléments fins du sol (argiles et matière organique évoluée) à retenir provisoirement les ions, principalement les cations en solution dans le sol.

La kaolinite avec une CEC de 6-8 me/100g⁸ en moyenne, l'illite (30 me/100g), la montmorillonite (80-120 me /100g et la vermiculite (140 me/100g). (Les principaux sols exondés des régions soudanienne contiennent essentiellement de la kaolinite, associée parfois avec des illites, donc des argile à faible CEC).

L'autre constituant du sol : la matière organique, se présente sous forme plus ou moins évoluée depuis les débris végétaux à rapport C/N variant de 40-50 dans les débris végétaux (pailles ...) jusqu' à 8-10 dans les humus ; c'est l'élément le plus important de la fertilité. La CEC très élevée de l'humus avec 260 me/100g d'humus (et jusqu'à 370 me/100g pour l'acide humique) est essentielle dans la CEC totale du sol. Le complexe argilo-humique (association étroite de l'humus et de l'argile) a de plus un rôle de ciment indispensable à la formation d'agrégats stables, base d'une bonne structure du sol.

Structure du sol : elle dépend de la qualité de ses éléments fins : argiles et matière organique. Ils agencent l'ensemble des particules en un milieu poreux dans lequel circulent l'eau et l'air indispensables à la vie des racines (exception du riz et des plantes adaptées aux sols inondés). Les plus gros pores favorisent l'aération ainsi que la circulation de l'eau lors de la phase de ressuyage rapide après les pluies (perméabilité); les pores plus ou moins fins, permettent le stockage par capillarité de l'eau qu'utilisera la plante (notion de Réserve Utile ou R.U. ou capacité de rétention). Une importante caractéristique du sol est sa densité apparente : indice de sa porosité. La quantité et la qualité de la matière organique sont les éléments essentiels de la fertilité des sols en général.

3.2.2 : Caractéristiques chimiques :

Comme on l'a vu dans le 1er chapitre, les plantes se nourrissent en éléments minéraux dissous dans l'eau du sol sous forme ionique : d'anions pour l'azote, le soufre et le phosphore, ou de cations pour K, Ca, Mg et les oligoéléments ; ils sont absorbés par les racines et envoyés dans les parties aériennes en même temps que la solution du sol. La partie essentielle, vivante peut-on dire d'un sol est son complexe argilo-humique qui sert de réservoir en éléments minéraux à court et moyen terme.

Le cycle organisation/minéralisation de la matière organique (ou turn-over) régit l'alimentation en azote, soufre et en grande partie en phosphore. C'est un processus complexe dans lequel les micro-organismes du sol jouent un rôle prépondérant ; la minéralisation ou destruction des éléments organiques libère des ions nitrates prélevés par les plantes ; elle conduit à la disparition de la matière organique s'il n'y a pas de compensation par des restitutions ou apports de matière organique fraîche ou déjà évoluée. C'est ce qui a tendance à se passer actuellement. Sous un climat chaud et humide, la minéralisation est prépondérante et le taux de matière organique baisse rapidement quand on met les sols en culture, il passe de 3% sous jachère de longue durée à 1.5 % après 3 ans de culture, puis moins de 1% après une dizaine d'années environ (Siband, 1972) (voir également CD rom Documents Tchad (Richard, Djoulet »). La fourniture d'azote par la matière organique est continue en saison des pluies, mais limitée, insuffisante pour satisfaire la plante quand ses besoins sont maximum ; ceci explique la nécessité d'une fumure azotée à la période critique pour les céréales dès les premières années de mise en culture.

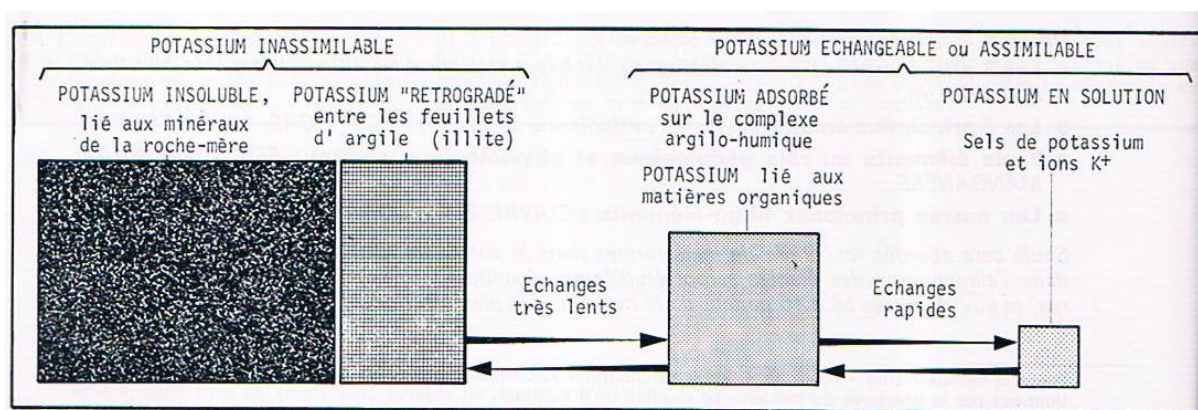
⁸ me = milliéquivalent, c'est-à-dire la millième partie du poids atomique de l'élément considéré divisé par sa valence : soit 39 mg pour K⁺, 20 pour Ca... 40 valence 2.

En saison sèche, les micro-organismes responsables du turn-over sont en sommeil ; ils reprennent leur activité au début de la saison des pluies où l'on observe un « pic de minéralisation » de l'azote, très favorable à la culture si elles ont été semées précocement.

Les autres éléments : P (en partie), K, Ca, Mg, oligo-éléments, sous formes minérales plus ou moins disponibles et formes dissoutes sont directement assimilables ou adsorbés sur le complexe argilo-humique.

Les cations K^+ , en solution ou fixés sur le complexe argilo-humique, qui constituent la réserve facilement utilisable à court terme, donnent l'impression que le sol n'est pas déficient en cet élément les premières années de culture, mais la culture n'étant pas réalimentée (par le 1^{er} compartiment) est assez vite épuisée, ce qui se traduit par une déficience de plus en plus marquée ; la carence en K devient un facteur limitant très sérieux. La situation est semblable pour Ca^{++} et Mg^{++} .

Figure 3.2 : Les 4 formes du potassium dans le sol *Extrait de D. Soltner 2000...les bases de la production végétale (tome1 le sol et son amélioration).*



Pour les cations principaux, on parle des « bases échangeables », on distingue en simplifiant quatre compartiments interconnectés absorbant ou libérant plus ou moins vite l'élément considéré. Par exemple pour la potasse (figure 3.2).

Les minéraux constitutifs de la roche mère, dits primaires, inexploitable à court et moyen terme, libèrent très lentement leurs constituants dont la potasse, un des plus importants pour les plantes. Il ne reste pratiquement pas de ces minéraux primaires dans les sols, très anciens, très altérés de la zone.

La somme des trois cations adsorbés (K, Ca, Mg) dits « bases échangeables » exprimée en me/100g, est notée conventionnellement S ; en la divisant par la CEC de ce sol, on obtient un taux de saturation en base, indice du degré de lixiviation du sol et lié à son acidité. En effet, le restant de la CEC cationique est occupé par des ions H ou Al générateurs d'acidité. Une forte acidité est nocive aux cultures en général, mais ces dernières y sont plus ou moins sensibles : le coton beaucoup, le manioc peu (l'IITA, en collaboration avec le Cimmyt, a créé des variétés de maïs résistantes à l'acidité)....

Le « phosphore » est toujours sous forme quasi insoluble ; il est donc peu mobile dans le sol, son absorption dépend du volume et de la densité du système racinaire. Cependant, certaines plantes sont capables d'absorber des formes inassimilables pour la plupart des

autres ; c'est le cas du pois d'angole (*Cajanus Cajan*) et du manioc (grâce à des endomycorhyses).

Chaque sol a ses propres caractéristiques chimiques, elles varient à l'intérieur même d'une catégorie pédologique. C'est pourquoi on ne peut donner, et on ne trouve d'ailleurs plus dans les ouvrages d'agronomie récents (telle la nouvelle version du mémento de l'agronome) de normes d'interprétation, seuils de déficiences et carences minérales, non seulement universelles, mais aussi régionales pour des sols d'une même classe. **C'est aux chercheurs d'établir très localement ces normes dans le cadre de leur expérimentation conjuguée avec des analyses de sols et de les transmettre à leurs successeurs.**

La fertilité est en général définie comme l'aptitude d'un sol à produire des récoltes en fonction de ses qualités intrinsèques dont on vient de traiter et des techniques culturales utilisées : ce qui somme toute, reste une notion assez relative ! Elle sera estimée différemment suivant les espérances de rendements propres aux environnements socio-économiques et techniques dans lesquelles on se trouve.

3.3 Les principaux sols exondés des zones soudaniennes

3.3.1 : A propos des classifications

Dans la nomenclature ordinaire des classifications pédologiques traditionnelles, dont la classification française, les principaux sols exondés des régions soudaniennes sont **des sols zonaux : ex. sols ferrugineux tropicaux et sols ferralitiques**, échelonnés du nord vers le sud avec une pluviosité croissante. La formation et les caractéristiques de ces sols s'y expliquent **par le climat de la zone** où ils se trouvent, caractérisés dans notre cas par des températures élevées et une forte pluviométrie saisonnière.

Ces classifications qui n'ont guère évolué depuis près de 50 ans ne sont plus acceptées en dehors des régions où elles ont été conçues : principalement l'Afrique pour la classification française. La classification dite « base de référence mondiale » (ou WRB : world référence base, comme elle est plus connue, proche de la classification américaine (USDA) qui a été initiée par la FAO, puis développée par l'ISRI à Wageningen, est actuellement acceptée dans tous les continents et au niveau des instituts internationaux. On ne tient plus compte ni du climat, ni même des analyses chimiques ! Elle repose sur la description extrêmement précise et codifiée (selon les normes USDA) des divers horizons. Elle n'est pas facile à assimiler, puis à relier aux préoccupations des agronomes et des services de développement.

Mais après tout, comme dit G. Bourgeon (communication personnelle), une classification moderne ou ancienne est surtout un moyen de communication avec ses termes d'usage familiers ou non aux agronomes ; à ce titre, la classification française peut garder une certaine utilité pour les chercheurs africains. C'est pourquoi on a rassemblé sur CD rom chapitre 3 (voir différents documents dont cartes et « géologie Tchad ») les seuls éléments disponibles pour les sols exondés du sud du Tchad ; ces données sont essentiellement extraites de la carte ORSTOM au 1/200.000 de G. Bouleyre avec notice (1965) ainsi que de la carte de S.Pias et de sa notice (1964 et 1970).

3.3.2 : Ce qui est déjà acquis à propos de leur fertilisation:

On sait depuis plus de 50 ans qu'on les étudie, que ces sols ont, outre leur insuffisance en matière organique, **de faibles réserves en phosphore assimilables** qui sont rapidement épuisées ; **c'est la première déficience à apparaître, avant celle en N parfois**. Les réserves en bases échangeables paraissent correctes au départ, mais ne sont pas renouvelées, faute de réserves totales en ces éléments : réserves échangeables une fois exploitées par les cultures et **cela d'autant plus vite que l'on exporte les pailles** et/ou perdues par lixiviation : la potasse d'abord qui deviendra **le premier facteur limitant**. Puis ce sera le tour du calcium et enfin du magnésium, au fur et à mesure que l'on fertilise en NP, puis NPK, puis en NPKCa. Quand les réserves en Ca s'épuisent, le sol devient acide et une toxicité aluminique peut apparaître.

Un agronome doit savoir tout cela pour les sols de sa région, il le trouve dans les études faites localement et dans des écologies semblables. Dans les archives de la station, il devrait exister un dossier synthétique relatif à l'état des connaissances sur les types de sols de la région et la fertilité, dossier mis à jour systématiquement par des lectures (d'articles, des résultats des derniers essais, etc....) ; malheureusement dans le cas du Tchad, les études pédologiques sont anciennes (années 60) ; de plus manque la synthèse des expérimentations conduites depuis quelques dizaines d'années ; il est indispensable de la faire (on peut s'appuyer sur les CD rom, disponibles au CIRAD, concernant des articles publiés par la **revue Coton et Fibres Tropicales**. Y sont traités tous les sujets qui concernent la région ; on s'aperçoit que l'on n'invente rien, que beaucoup de problèmes ont été étudiés auparavant...

3.4: **évolution de la fertilité des sols sous culture : le sol « produit du système de culture »**

3.4.1 : la végétation naturelle et les sols.

La végétation naturelle « climacique » (terme à rapprocher de celui de zonal utilisé pour les sols) va du sud au nord de la forêt à la savane à grandes graminées pyrophiles survivant aux feux de brousse ; les deux végétations sont constituées **de plantes pérennes à enracinement profond bien adaptées au problème de la zone** : l'excès saisonnier de précipitations. Ces graminées suppriment les pertes par lixiviation en profondeur, car les ions en solution sont filtrés par leurs systèmes racinaires très profonds et permanents, puis remontés en surface par cette même végétation ; de plus le sol est protégé contre l'érosion. Comme il n'y a pas d'exportations, les feuilles et les tiges mortes s'accumulent en litière organique, celle-ci digérée par les micro-organismes se transforme et enrichit le sol en matière organique jusqu'à des taux supérieurs aux besoins de l'agriculture.

Voir § 2.2.1 concernant le bilan hydrique dont s'inspire le modèle pour les SCV et les cultures en couloirs qui furent amplement à la mode avec l'IITA.

3.4.2 : évolution des sols après leur mise en culture

Comme on l'a évoqué plus haut, les exportations par les cultures, aggravées avec l'enlèvement des pailles pour divers usages, les pertes par lixiviation hors de portée des plantes faute d'un filtre de racines permanent suffisamment profond et les pertes en éléments fins par érosion sélective, entraînent un inévitable appauvrissement du sol proportionnel à la durée de son exploitation et une baisse conséquente de la production. **La**

chute du taux de matière organique après mise en culture est lui d'autant plus rapide que le sol est travaillé par les labours à la charrue (plus que par l'usage de la daba)⁹.

Parallèlement les adventices, mauvaises herbes **héliophiles** généralement annuelles, se multiplient exponentiellement d'une année sur l'autre par graines ; elles envahissent le champ, concurrençant de plus en plus gravement les cultures pour la lumière, l'eau et les éléments minéraux. Le travail de sarclage pour les maîtriser devient la principale contrainte du calendrier agricole au point que les champs seraient abandonnés à la jachère à cause des mauvaises herbes principalement. La baisse de fertilité ne devenant vraiment grave que lorsqu'on manque de terres pour mettre les sols en jachères pour des durées suffisantes.

3.4.3 : Les jachères et leur rôle :

La jachère naturelle, la plus ancienne solution de maintien de la fertilité des sols, **c'est le retour à la végétation climacique** : la forêt ou en cas de feux de brousse systématique : la savane selon la pluviosité. Cette végétation pérenne, au fur et à mesure qu'elle couvre le sol de façon permanente, étouffe les mauvaises herbes héliophiles et les empêche de se multiplier ; elles seront donc éliminées en fonction de la durée du pouvoir germinatif de leurs graines ; il ne faut que 2 ans pour beaucoup d'entre elles ; en 6 ans, la grande majorité aura disparu. Pendant ce temps, la remontée dans les horizons de surface par les racines des nutriments (P, K,...) stockés en profondeur, reconstitue la fertilité minérale de l'horizon agricole et l'accumulation de matière organique fraîche par la litière et un système racinaire très développé.

Si la pression foncière n'est pas trop forte, la jachère améliorée de courte durée est une solution envisageable, bien qu'insuffisante sans fertilisation des cultures qui la suivent (voir l'annexe 3.1 : « Les jachères » Werts, 1976) sur la jachère de deux ans à *Andropogon* et ses avantages : enrichissement en matière organique, régénération de la structure, élimination d'une grande partie des adventices.

3.5 : Bilan minéral du système coton-sorgho :

Cette question a été abordée depuis longtemps par les chercheurs de l'IRCT.

Il n'est pas nécessaire de tenir compte des réserves du sol qui sont à priori déjà assez faibles pour qu'il soit maintenant indispensable de les économiser : il reste très peu de reliquats en azote (chute du taux de matière organique), de réserves en phosphore (insuffisantes dès l'origine) et de bases échangeables (celles-ci ne se renouvelant pas).

Restent en balance les apports d'engrais organiques et ou minéraux d'un côté, et de l'autre les pertes diverses : exportations par les cultures, lixiviation, plus éventuellement, celles par érosion. Pour les entrées, on sait qu'au mieux en pratique, elles consistent en la fumure minérale vulgarisée : 100 kg de NPKSB 19-12-19-5-1, plus 50 kg d'urée (23 N) pour un hectare sur le coton, puis, assez rarement d'ailleurs, 100 kg d'urée sur la céréale qui suit le coton. Elle est en principe, mais très exceptionnellement, renforcée par 3 à 5 t/ha de poudrette de parc tous les deux ans, ce qui pourrait tout changer comme le montre l'exemple du Sud Mali (J. Gigou, 1997 Cd rom chap. 3). Pour les sorties, l'essentiel provient des

⁹ Les sols de bas- fond périodiquement inondés se comportent différemment l'évolution de la matière organique étant très ralentie faute d'oxygène dans le sol.

exportations par les parties aériennes de la culture : on les estimera avec les moyennes données dans l'annexe 1.2 « exportations minérales » C. Piéri et rappelées ci-dessous :

3.5.1 : Fumure strictement minérale :

Tableau 3.1 : mobilisations minérales standards des parties aériennes pour 1 tonne de produit récolté.

		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
coton	graines	22	8	12	2.5	3.5
	total	36	11	34	15.5	8.5
sorgho	grains	13	8	5	0.5	2.5
	total	20	12	30	8	7

On fait l'hypothèse que les tiges du coton sont brûlées sur place, comme il est recommandé : donc que **seul l'azote est alors perdu**, et que les tiges du sorgho sont enlevées comme l'usage s'est généralisé : les exportations sur un cycle des deux cultures produisant chacune 1 t/ha de grains s'élèvent à :

56 N (36 + 20) -20 P₂O₅ (8 + 12) -42 K₂O (12 + 30) - 10 Ca O (2.5 + 8) - 10 MgO (3.5 + 7).
(Voir CD rom chap. 3 "Bilans mineral et organique").

Avec le seul apport de la fumure minérale préconisée, ce qui n'est pourtant pas le cas général, le bilan est déjà négatif, sauf pour l'azote :

		N	P2O5	K2O	CaO	MgO
exportation coton : pour 1 tonne de coton (tiges brûlées)		36	8	12	2.5	3.5
exportation sorgho : 1 tonne de graines + tiges		20	12	30	8	7
	export total	56	20	42	10.5	10.5
type engrais	apport kg/ha					
coton NPKSB (19-12-19-5-1)	100	19	12	19	0	0
coton urée (45)	50	22.5				
sorgho urée (45)	100	45				
	apport total	86.5	12	19	0	0
	bilan	+30.5	-8	-23	-10.5	-10.5

moins 8 kg de P₂O₅ ; -23 de K₂O ; -10 de CaO et -10 de MgO..... et ceci sans avoir pris en compte les **pertes par érosion et par lixiviation** qui sont très difficilement évaluables, faute de mesures, mais que l'on peut supposer considérables vue l'importance de l'excès des pluies saisonnières dans la région.

Si on suppose, avec optimisme, que l'érosion est contrôlée : **les pertes par lixiviation en N, K, Ca et Mg risquent d'être particulièrement importantes** (voir § 2.2.3.). Il n'est pas surprenant qu'après plusieurs cycles similaires, le sol soit devenu trop pauvre en Ca et donc acide. L'apport de chaux nécessaire a été estimé à 100 kg de CaO/ha par 100 kg d'urée apportés (Sément, IRCT) (voir également annexe 3.2 : « Rappel des notions de chimie appliquées aux engrais minéraux»). Plus tard se sont manifestées les carences en magnésium (absent de la fumure) et en potasse, éléments apportés en quantité très insuffisante dans la formule vulgarisée, compte tenu surtout des exportations dans les tiges de céréales.

Parallèlement, le sol s'appauvrit de façon continue en matière organique, ce qui aggrave la baisse de fertilité. L'apport complémentaire de fumier de parc à faible dose 5 t/ha tous les 2 ans est indispensable dans de tels systèmes.

3.5.2 : avec apport complémentaire de fumier

Les fumures organiques ont l'avantage d'apporter des quantités plus ou moins importantes de tous les éléments nécessaires aux cultures (c'est bien normal puisqu'elles en sont la source directe ou indirecte via les déjections animales) qui ont aussi l'énorme intérêt d'améliorer les qualités physiques et le complexe absorbant du sol.

Il faut rappeler, après bien d'autres explications que l'usage de fumier, qu'elle que soit sa nature, correspond à des transferts de fertilité : soit à partir de l'extérieur, soit à l'intérieur de l'exploitation ; le problème de fertilité est en quelque sorte déplacé des terres de pâture à celles de culture. L'exception est l'utilisation des tiges de céréales comme litière ou/et fourrage.

Le fumier de parc est encore une ressource réelle, mais en quantité malheureusement bien réduite. Seules de faibles doses d'apport, inférieures à 5 t/ha, sont envisageables. De plus, ils sont souvent mélangés à de la terre et plutôt pauvres. Leur composition est aussi très variable d'une région à l'autre et même à de courtes distances.

On donne ci-dessous, à titre d'exemple, la composition moyenne en pourcentage de la matière sèche sauf pour la teneur en eau (% du total) de 6 échantillons prélevés sur les Plateaux malgaches (J. Arrivets et al 1977, voir essai BC dans la 2^{ème} partie) :

Tableau 3.2 : Composition moyenne de la poudrette de parc en % de la Matière sèche

	H ₂ O	SiO ₂	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Moyenne	65	39	27	1.3	0.8	1.6	1.0	0.6
minimum	55	26	12	0.8	0.6	0.7	0.5	0.3
maximum	75	56	32	1.6	1.0	3.4	1.6	1.3

On note la forte humidité (2/3 du poids en moyenne sur des échantillons prélevés après le démarrage des pluies) juste avant le labour d'enfouissement et la forte proportion de terre (indiquée par la teneur en silice : 40% de SiO₂) en mélange avec les éléments minéraux.

C'est un « fumier » très pauvre, mais probablement assez représentatif pour les zones très pluvieuses ne fournissant pour 1 tonne de MS que : 13 N +8 P₂O₅ +16 K₂O + 10 CaO + 6 MgO par rapport aux données de C. Pieri¹⁰ pour 1 tonne de MS : 22 N +11 P₂O₅ + 48 K₂O + 30 CaO +21 MgO. Une moyenne des deux fournirait par tonne : 18 N +10 P₂O₅ + 32 K₂O + 20 CaO +14 MgO. L'apport complémentaire de 5 tonnes de fumier frais, à 60% d'humidité (équivalent à 2 tonnes de fumier matière sèche : (100-60) x 5 t / 100 = 2 tonnes) fournirait alors :

36 N + 20 P₂O₅ + 64 K₂O + 40 CaO +28 MgO. Le bilan de la fumure organo-minérale recommandée est alors largement positif pour tous les éléments par rapport aux exportations des deux cultures quand on ne tient pas compte des autres pertes bien entendu.

¹⁰ (Source: Piéri C. "Fertilité des terres de savanes" Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. MinCoop CIRAD-IRAT 1989)

Faute de poudrette, le fumier de ferme fabriqué sur l'exploitation en y intégrant un élevage bovin valorisant les résidus de récolte (fanés d'arachide et de niébé, pailles des céréales) est la solution recommandée. Voir également sur CD rom chap. 3 « Bilans minéral et organique » des exemples détaillés de bilans pour différentes sources d'apports.

3.5.3 : la révision de la fumure minérale est nécessaire

Le bilan avec la seule fumure minérale fait déjà apparaître un excès des seules exportations par la culture pour la potasse et le magnésium ; l'expérimentation concernant ce problème est en cours dans la majorité des pays de la zone cotonnière soudanienne en particulier à Bébédjia pour le Tchad.

On semble engagé dans une course sans fin avec un sérieux handicap : en effet pour conserver au sol sa fertilité, il faudrait en principe que la fertilisation compense :

*toutes les pertes minérales du sol, c'est à dire : les exportations de la culture, les pertes par lixiviation en profondeur et celles par érosion.

*l'appauvrissement du sol en dessous d'un certain seuil de matière organique, seuil à déterminer pour chaque type de sol dans chaque zone.

Au total sont nécessaires des quantités d'engrais (fumier et/ou fumure minérale) considérables même avec des objectifs de rendements raisonnables. Or d'une part, comme on l'a dit plus haut, les disponibilités en fumier (de la poudrette de parc pour l'essentiel) sont très réduites et d'autre part, le prix des engrais est trop élevé comparé à celui des produits récoltés ; de plus en zones soudano-sahélienne et surtout sahélienne, l'efficacité des fumures peut être très compromise par l'irrégularité des pluies¹¹.

Le prix des engrais minéraux est grevé par le coût des transports lié à l'enclavement du pays (voir tableau 3.3).

Tableau 3.3 : prix de revient (Fcfa) pour la COTONTCHAD de 100 kg d'engrais en 1994.

Prix FOB port européen	11.500	Indice 100
Prix CAF Douala	14.000	122
Prix rendu usine	23.000	200
Prix rendu marché comptant	24.000	210
Prix rendu marché à crédit	30.000	260

(Source : BEROUD 1994)

Ces prix s'entendaient pour un marché supérieur à 15.000 tonnes, passé directement par appel d'offre par la COTONTCHAD, et pour une mise en place dans les villages en fret retour de camions de coton-graines, sans marge bénéficiaire, ni commission de gestion pour la société cotonnière.

¹¹ Dans les systèmes intensifs l'usage des fortes fumures est à peu près systématiquement associé à l'irrigation, les deux se complétant ; sans oublier que les productions (les producteurs à vrai dire) sont en général subventionnées

Le principe de la compensation de toutes les pertes est bien difficilement applicable dans ces conditions.

Par ailleurs, le recours à la fumure minérale n'avait pu se réaliser que par le biais du système coton, grâce à l'existence de structures de développement très encadrantes assurant le débouché du produit à un prix convenable et l'approvisionnement en intrants (en temps voulu à crédit sur récolte) ainsi que l'évacuation de la production sans retard exagéré! Et qu'en est-il du développement de l'élevage intégré aux exploitations, préconisé depuis des lustres? Reste aussi à résoudre les problèmes de cohabitation de l'agriculture et de l'élevage transhumant. On sort ici de beaucoup du cadre de l'atelier!

3.6 : de l'efficacité des engrais minéraux

3.6.1 : les différentes sortes d'engrais, plus ou moins concentrés.

On trouvera en annexe 3.2 « rappel de notions de chimie appliquées aux engrais minéraux » et CD rom chapitre 3 « Fiche engrais » un exposé général sur la composition des engrais courants. Pour répartir le coût du transport sur le maximum d'unités fertilisantes efficaces (N, P, K...), seuls les engrais les plus concentrés et les plus largement disponibles peuvent être recommandés localement : les engrais complexes d'abord dont la formule COTONTCHAD est un bel exemple et parmi les engrais simples : l'urée, le superphosphate triple, le phosphate d'ammoniac ainsi que les chlorure ou sulfate de potasse. En pratique, seuls les engrais complexes et l'urée qui peuvent être importés en grandes quantités sont, en général disponibles ; les deux se présentent sous forme de granulés : donc faciles à épandre manuellement (avantage important), mais dans le cas de l'urée difficile à stocker.

3.6.2 : solubilité des engrais et dates d'épandage :

Les phosphates peu solubles et les apports de bases échangeables (K, Ca, MgO) qui peuvent être momentanément stockés sur le complexe absorbant, peuvent et sont épandus avant labour. Les engrais azotés très solubles, donc sujet à être perdus par lixiviation sont apportés en partie avec P, K..., et en partie avant les phases critiques vers le 30^{ème} jour après semis pour le maïs par exemple.

3.6.3 : lois d'action des engrais minéraux.

Loi du minimum ou des facteurs limitants : la question de l'eau déjà traitée mise à part, le rendement d'une culture est déterminé par l'élément qui se trouve en plus faible quantité dans les horizons de culture relativement aux besoins de la plante.

Loi des suppléments de rendements moins que proportionnels (ou de Mitscherlich) : les essais de réponse à l'apport d'un élément (N, P, K ou...), les autres étant fournis en quantité suffisante, montrent que l'augmentation des rendements est la plus forte pour les doses les plus faibles et va en décroissant au fur et à mesure que l'on augmente les doses jusqu'à devenir nulle, si ce n'est négative (toxicité par excès).

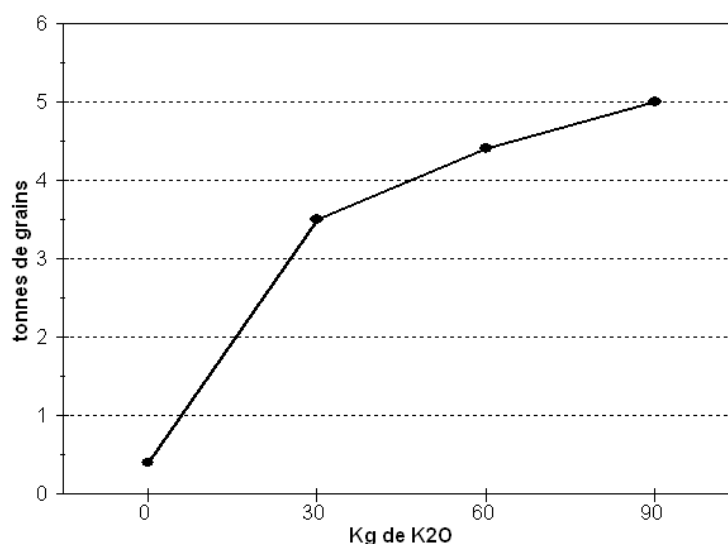
Un essai de doses croissantes de potasse sur un sol que l'on savait carencé en tous ses éléments (la production d'un témoin absolu est nulle) peut illustrer ces deux lois : les quatre traitements comparés (0-30-60-90 kg K₂O /ha) recevaient des doses uniformes convenables de N, P, Ca et Mg ; les rendements de maïs grains sont représentés dans la figure 3.4 ci-après.

La production du témoin sans potasse est dérisoire malgré une fumure NPCaMg correcte (et une pluviosité qui était favorable): **l'absence de potasse est ici le 1^{er} facteur limitant** presque absolu de l'efficacité des autres engrais !

La première dose de potasse provoque un supplément de récolte de 3,1 tonnes de grains pour 30 kg de K_2O : soit environ 100 kg de grains par kg de potasse ! En fait, c'est l'ensemble de la fumure NPKCaMg qui est à créditer de l'accroissement de la production ; un calcul de rentabilité de l'apport de la seule potasse sans tenir compte des autres engrais n'aurait pas de sens.

La deuxième dose provoque un supplément de récolte de 0,9 t de grains, soit 30kg de grains par kg de potasse supplémentaire, pour la troisième dose : le supplément est de 0,6 t, soit 20 kg de grains par kg de potasse ; **les accroissement de production sont donc moins que proportionnels à l'augmentation des apports de potasse.**

Figure 3.3 doses croissantes de K_2O



La valeur du rapport du poids de supplément de récolte en grains au poids du supplément d'engrais que l'on vient d'utiliser dans le § précédent est **appelé index de productivité** (IP). On peut l'exprimer, comme plus haut, en kg de grains par unité fertilisante ou par unité de l'engrais utilisé. Ainsi, si la potasse a été apportée sous forme de chlorure de K (dosant 60% de K_2O , soit 50 kg de KCl pour 30 kg de K_2O), les IP de l'exemple deviendront : $3000/50 = 60$ pour la 1^{ère} dose , 18 pour la 2^{ème} et 12 pour la 3^{ème}. Ne pas perdre de vue que ce n'est pas valable pour la 1^{ère} dose quand on a affaire à un facteur limitant. Pour calculer **la rentabilité de la fumure**, il n'est alors besoin que de connaître le rapport des prix du maïs et de l'engrais. Ce qui importe en fait, c'est le rapport de la valeur du supplément de récolte rendu au marché au coût de la dose d'engrais rendue au champ. Il ne faut pas négliger les charges dues aux transports ; même si elles ne sont pas chiffrées en monnaie : ces charges sont estimées en terme d'efforts par l'agriculteur ; elles peuvent être rédhibitoires, surtout quand il ne dispose pas de charrette.

On peut également caractériser l'efficacité d'un engrais par son **coefficient d'utilisation apparente**¹² ; il exprime le % de l'engrais qui paraît avoir été utilisé par la culture. Exemple : en admettant d'une part que le maïs mobilise dans les parties aériennes 10 kg de N pour produire 1 tonne de grains (cf § 1.6 : fiche de culture du maïs) et que d'autre part, l'apport de 100 kg d'urée (à 45 N) provoque un surcroît de production égal à 1,5 tonnes de grains (soit 15 kg de N), le coefficient apparent de l'utilisation de l'azote sera de : $15/45 = 1/3$ (soit 1/3 de N apporté a été mobilisé dans les grains).

3.6.4 : Fumure initiale et fumure d'entretien, de redressement : effets directs, résiduels ou cumulatifs.

Lorsqu'un sol, déjà cultivé ou en défriche, est fertilisé pour la première fois, on parle de **fertilisation initiale** ; si le sol est gravement carencé en un ou plusieurs éléments, les apports en ce (ces) élément(s) doivent être plus élevés que les besoins de la plante, parfois de beaucoup, on parle alors de **fumure de redressement de la fertilité**. Par la suite, on se limite à apporter les quantités nécessaires pour la production souhaitée, compte tenu des pertes prévisibles par lixiviation ... on parle de **fumure d'entretien**.

Le supplément immédiat de la récolte entraîné par une fumure, l'année de son apport est qualifié d'effet direct. Les suppléments, s'il y en a, que la fumure provoque les années suivantes, sont appelés effets résiduels de 1^{ère}, 2^{ème}, ... années. Enfin, on appelle effets cumulatifs, les suppléments entraînés par des apports d'engrais annuels cumulés (voir tableau 3.4).

Tableau 3.4 : effets directs et résiduels ou cumulatifs.

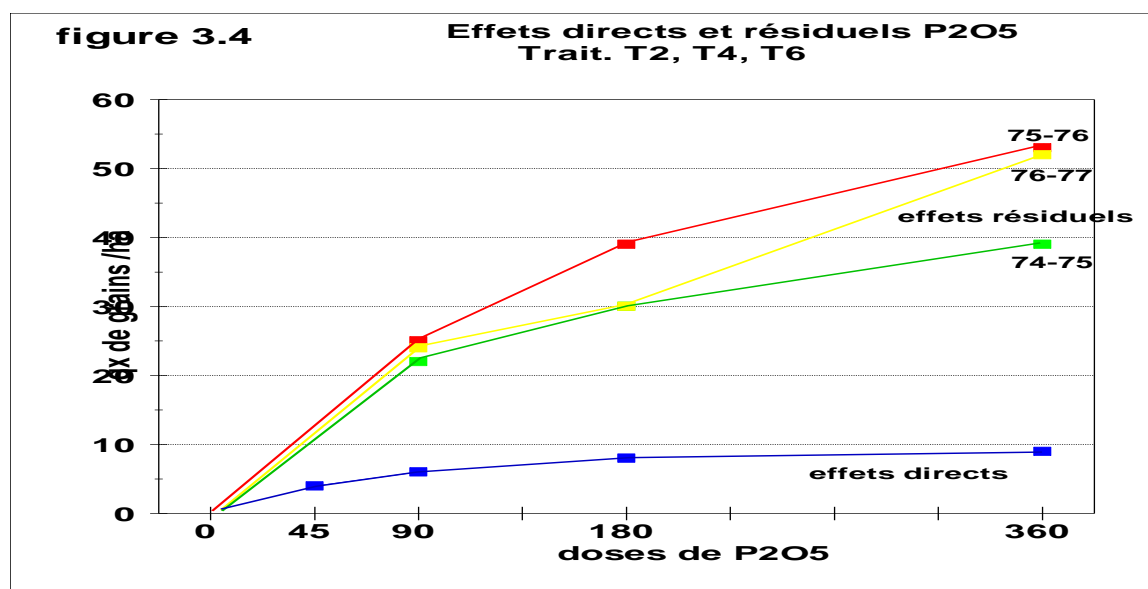
Traitements	1 ^{ère} année		2 ^{ème} année	
	Fumure	effet	Fumure	effet
Témoin To	000		000	
T npk	NPK	Effet direct	NPK	Effet cumulatif
T' npk	NPK	Effet direct	000	Effet résiduel

Les résultats d'un essai de fumure phosphatée du maïs dans lequel sont combinés des apports initiaux et des apports d'entretien (voir tableau 3.5), en fournissant une illustration. L'essai a été conduit sur un sol en défriche, très carencé initialement en phosphore assimilable.

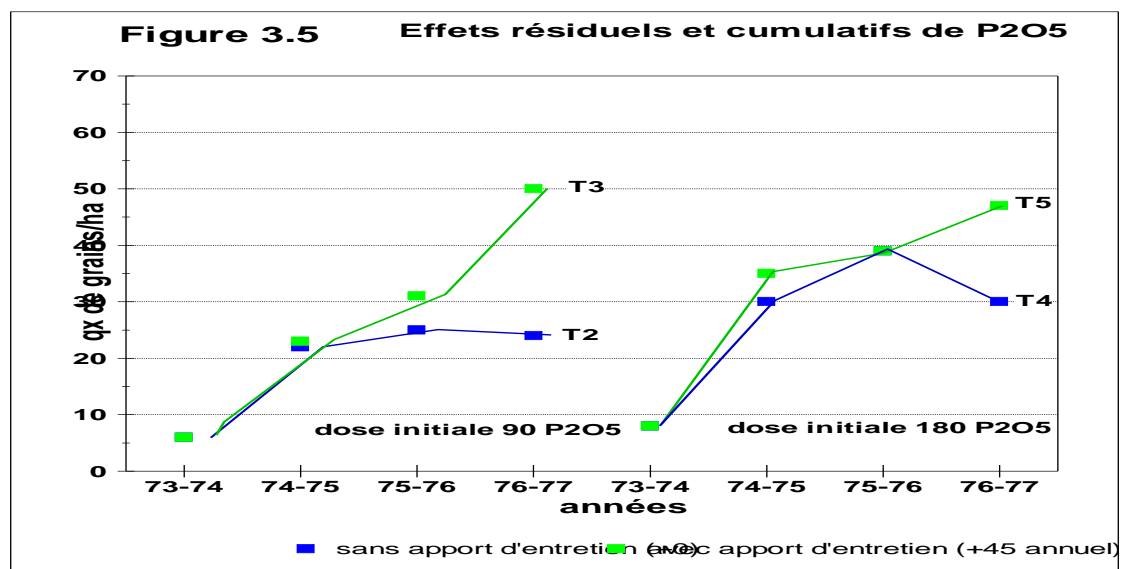
¹² On dit que le coefficient est apparent car si la plante a bien prélevé une partie de l'azote engrais il a aussi utilisé celui du sol (les deux formes étant impliquées dans le turn-over).

Tableau 3.5 : essai fumure initiale x fumure d'entretien P_2O_5 en qx grains/ha (Tananarive 1983)

Trait.	Apport P_2O_5		Production : qx de grains de maïs/ha			
	Initiaux entretiens		73-74	74-75	75-76	76-77
T1	45	45	4	20	27	42
T2	90	0	6	22	25	24
T3		45		23	31	50
T4	180	0	8	30	39	30
T5		45		35	39	47
T6	360	0	9	39	53	52



De façon similaire, la fumure d'entretien apportée en 2^{ème} année n'a presque pas d'effet immédiat la même année, mais est considérable l'année suivante : effet résiduel et cumulatif (voir figure 3.5).



Ce phénomène sans que les causes en soient vraiment connues, est qualifié d' « effet défriche », peut-être lié à l'inaptitude des populations microbiennes d'origine dans les sols à « digérer » le phosphore minéral pour le transformer rapidement en formes assimilables.

2^{ème} partie : Les bases théoriques et pratiques de l'expérimentation de plein champ.

Sommaire

2^{ème} partie : Rappel des bases théoriques et pratiques de l'expérimentation de plein champ

Chapitre 4 : Aperçu sur la théorie de l'expérimentation de plein champ

- 4.1 Nécessité des répétitions dans l'expérimentation fig. 4.1
- 4.2 Définitions, loi Normale, moyenne et écart-type fig. 4.2, fig. 4.3
- 4.3 Estimation des paramètres de la loi Normale Croissance et développement
- 4.4 Les principes de base de l'expérimentation au champ
- 4.5 Le modèle mathématique associé au plan d'expérience et analyse des résultats avec un test de comparaison des variances. Cas où un seul facteur est étudié , ex ; essai LCTA
 - 4.5.1 : Un dispositif à proprement parlé comprend deux composantes Tab. 4.1
 - 4.5.2 : test de comparaison de variances, loi de Fisher-Snédecor Tab. 4.2, Tab. 4.3
Tab. 4.4
 - 4.5.3 Test de comparaison des moyennes : ppds entre traitements Fig. 4.4
- 4.6 Essais avec plusieurs facteurs, concept d'interaction entre ces facteurs, avantage des dispositifs factoriels
 - 4.6.1 : cas le plus simple, le factoriel 2² Tab. 4.5, Tab. 4.6
 - 4.6.2 : Essais factoriels plus complexes Tab. 4.7
 - 4.6.3 : les dispositifs orthogonaux non strictement factoriels , ex. essai LCTB Tab. 4.8, Tab. 4.9, Tab 4.10

Chapitre 5 : Pratique l'expérimentation au champ

- 5.1 Analyse du problème complexe à traiter, réduction à des questions simples .
- 5.2 Choix des traitements
 - 5.2.1 : Les témoins Tab. 5.1
 - 5.2.2 : Les nouveaux traitements et les dispositifs
- 5.3 Dispositifs simples et pratiques
 - 5.3.1 : les essais soustractifs
 - 5.3.2 : Les courbes de réponse à un seul élément fig. 5.1, fig. 5.2
 - 5.3.3 : Les tests FAO fig. 5.3, fig. 5.4
 - 5.3.4 : Les carrés latins fig. 5.5

5.4	Dispositif avec subdivision des parcelles	
5.4.1	: Split-plot	fig. 5.6
5.4.2	: Criss-cross ou « bandes croisées »	fig. 5.7
5.5	Dispositifs répétés en plusieurs lieux et/ou plusieurs années	
5.6	Réseau d'essais régionaux, de la station au test en milieu réel	
5.6.1	: Dimensions des parcelles élémentaires et nombre de traitements	
5.6.2	: Durée des essais pour les 3 niveaux d'expérimentation	Tab. 5.2
5.6.3	: Nombre de répétitions	
5.7	Rotations, essais avec plusieurs séries	Tab. 5.3
Chapitre 6	: De la conception du protocole à la rédaction du compte rendu de l'essai	fig. 6.1
6.1	Etablir un dossier préparatoire de l'essai	
6.2	Protocole type	
6.2.1	: Les calendriers prévisionnels	
6.3	Conduite de l'essai	
6.4	Dossier des résultats et esquisse de compte rendu	
6.5	Analyse statistique des données pour confirmation des conclusions précédentes	
6.6	Rédaction du compte rendu analytique définitif	
6.7	Suite à donner	

Il ressortait de notre questionnaire portant sur les motivations des stagiaires que leur demande portait en priorité sur « les statistiques » ; bien que ce soit, tout compte fait, accessoire dans le processus de l'expérimentation, mais nous ne pouvions nous y soustraire.

Les chercheurs disposent actuellement d'ordinateurs portables avec des logiciels de traitements des résultats des principaux dispositifs. Il semble suffisant que les chercheurs puissent lire et interpréter un tableau d'analyse de variance, encore faut-il savoir ce que le tableau résume et représente.

Nous rejetons l'idée déraisonnable d'inciter les chercheurs à revenir aux longs et fastidieux calculs d'autrefois plutôt que de bénéficier des facilités actuelles, encore moins d'avoir la prétention de condenser en quelques pages la complexité des analyses statistiques. Notre intention est d'exposer uniquement les principes de base de ces analyses afin de mieux faire comprendre ce que font les logiciels comme Xstat et Statbox, pour mieux les exploiter.¹³.

¹³Cependant selon Eric Gozé, statisticien au CIRAD, la maîtrise de ces logiciels demande du temps et une pratique régulière ce qui n'est pas la situation d'un chercheur conduisant 3 ou 4 essais au mieux, dont les résultats seront traités en quelques heures. Un Service de méthodologie, à créer, leur serait bien utile.

Les conditions de travail locales difficiles ne sont pas favorables à l'utilisation de dispositifs complexes lourds et délicats à conduire. Nous nous bornerons à traiter des dispositifs simples, qui ont fait leur preuve depuis plus de 50 ans que l'on fait des essais en Afrique, principalement le plus utile et le plus utilisé : celui des blocs de Fisher.

Quand nous donnons certaines précisions non indispensables, elles sont regroupées dans des annexes qu'il n'est pas forcément nécessaire de consulter.

Nous avons eu essentiellement recours aux documents très didactiques de Vessereau et de l'ITCF et surtout celui de Lecompt (1965) (voir : références bibliographiques et Cd-rom chapitre 4 «Michel Lecompt expérimentation et les engrais »).

Nous en avons retenu les résultats d'un essai simple en blocs de Fisher à 5 traitements et 4 répétitions (voir son plan d'expérience : figure 4.1). Nous en avons modifié les traitements sous deux versions différentes¹⁴, notées LCTA et LCTB¹⁵ pour les adapter aux problèmes locaux et aux besoins de nos exposés (voir tableau 4.1).

Tableau 4.1 : apports d'engrais en kg ou tonnes (t) /ha sur les traitements des deux variantes de l'essai LCT

Traitements	LCTA	LCTB
1	Témoin sans engrais	témoin sans engrais
2	100 kg d'urée	apport de 30N seul
3	2-3 t de tourteau de coton	apport de 30N + 30P ₂ O ₅
4	100 kg d'engrais coton	apport de 30N + 30K ₂ O
5	3 t de poudrette de parc	apport de 30N + 30P ₂ O ₅ + 30K ₂ O *

* par exemple : apport de 200 kg/ha de 15, 15, 15

La première variante, notée LCTA, est un dispositif à un seul facteur, dont les traitements n'ont à priori aucun lien entre eux. Elle permet au §4.5 et dans l'annexe 4.1 « Analyse de l'essai LCTA » de présenter le test F de comparaison de variances à plusieurs degrés de liberté, puis les tests de comparaison de moyennes (ppds ou *plus petite différence significative*.....).

Dans la deuxième variante, notée LCTB, les traitements peuvent être assemblés en groupes (avec ou sans N, P ou K) que l'on peut opposer et comparer entre eux ; elle sert à présenter dans le § 4.6 l'approche plus efficace de l'utilisation du seul test F par le biais des contrastes orthogonaux.

Le chapitre 5, quant à lui, porte sur les questions pratiques de l'expérimentation au champ et aux principaux dispositifs qui semblent adaptés aux conditions locales.

Dans le 6^{ème} chapitre sont résumées les différentes étapes du travail depuis la conception du protocole de l'essai jusqu'aux comptes rendus des résultats.

¹⁴ Mais avec le même plan d'expérience (voir figure 4.1)

¹⁵ LCT pour : LeCompT

Chapitre 4. Aperçus sur la théorie de l'expérimentation de plein-champ

4.1. Nécessité des répétitions dans l'expérimentation.

On a recours à l'expérimentation de plein champ quand on veut améliorer les techniques culturales actuellement pratiquées par les paysans, techniques dont les résultats ne sont plus satisfaisants pour la production. Cela peut porter sur le choix d'une nouvelle variété, de méthodes de lutte contre les maladies et parasites ... ou en ce qui nous concerne, toute technique influençant la fertilité au sens large et plus particulièrement les fumures. On va tester sur des placeaux **d'un même champ** l'effet sur les rendements de nouvelles techniques comparé aux rendements des techniques actuelles.

A la fin de la 1^{ère} partie, différents problèmes de fertilité qui méritent d'être étudiées au Tchad ont été signalés, par exemple : celui des sols épuisés des bassins cotonniers et celui de la fumure des céréales dans des rotations sans coton : donc ne recevant en principe aucun engrais. On retiendra dans ce qui suit comme support pédagogique le 2^{ème} cas, plus simple. On utilisera pour cela les résultats de l'essai LCT mentionné plus haut, dont les traitements ont été adaptés à la question traitée.

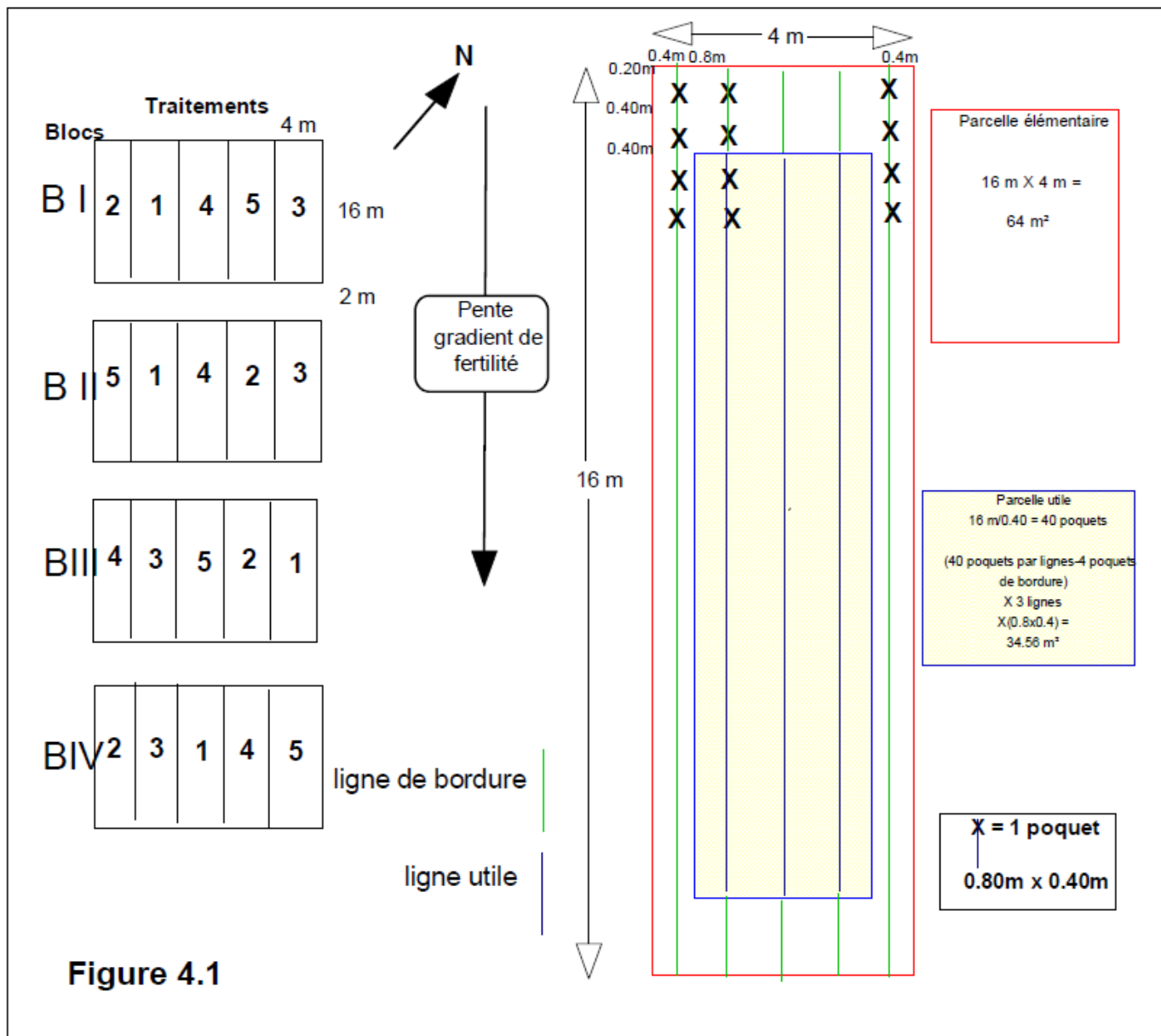
La cible est le petit paysannat de la zone soudanienne ne cultivant pas de coton, mais essentiellement des céréales dans une zone non surpeuplée, **avec possibilité de jachères**, quoique de plus en plus courtes. Les sols ne sont pas encore épuisés, mais les rendements sont trop faibles.

Dans une première hypothèse, on envisage de tester dans l'essai LCTA, l'efficacité des différents engrais que l'on se procure facilement dans la région : le fumier de parc, les tourteaux de coton, l'engrais coton et l'urée.

On supposera, bien entendu, que la fertilité du champ d'expérience, sur lequel on va comparer ces 5 traitements (dont témoin 0) est uniforme et **représentative de celle des champs des paysans**. L'expérience a montré et la théorie démontré que si les traitements n'étaient représentés que par une seule petite parcelle, les résultats ne seraient pas fiables. On sait que de multiples causes expliquent la dispersion des rendements entre les champs des paysans dans une même petite région qui semble homogène : la pluviosité très variable sur de courtes distances, des différences de fertilité du sol dues à sa nature ou à son passé cultural, des techniques culturales différentes (dates de semis plus ou moins précoces, contrôle plus ou moins efficace des mauvaises herbes...) et bien d'autres raisons (variétés, fumures, parasites...).

A l'intérieur d'un seul champ au sol apparemment uniforme, certaines des mêmes causes peuvent jouer et la dispersion des rendements peut être encore considérable sur des placeaux de faibles surfaces pris dans ce champ, sans que l'on puisse savoir quelle en est la raison effective. On dit que le rendement (ou toute autre observation sur la culture) de la **« population »** de ces placeaux est une **variable aléatoire**.

Figure 4.1 : Plan d'expérience de l'essai LCT A ou B



Le problème pratique de l'expérimentateur est de pouvoir juger si les différences de production entre traitements comparés sont bien dues aux traitements eux mêmes et non à des facteurs incontrôlés ou à l'imprécision des mesures, donc au hasard (aléas).

On sait depuis toujours qu'il faut répéter une expérience, quel qu'en soit le domaine, pour en tirer des conclusions probables, raisonnablement acceptables sans trop de risques¹⁶.

Dans l'exemple LCT que nous utilisons, il y aura 4 répétitions des 5 traitements définis plus haut, soit au total 20 placeaux, de même surface (figure 4.1).

¹⁶ Un des exemples concernant surtout l'imprécision des mesures : à savoir leur variabilité, est l'ancienne règle des pharmaciens : pour déterminer le poids d'un produit, ils en faisaient trois pesées et en prenaient la moyenne, après avoir éliminée l'une d'entre elles si elle différait par trop des deux autres.

Les théories qui sous-tendent l'expérimentation agronomique et permettent de juger de la validité de ses résultats sont fondées sur l'hypothèse de la « normalité » de la distribution des observations et le principe des répétitions. Sur cette base, « l'art » des méthodes d'expérimentation revient à faire la part des effets des traitements et des effets du hasard.

4.2 Définitions ...loi normale, moyenne et écart-type

On appelle **traitements** les différentes techniques comparées, le **traitement témoin** étant celui qui représente la situation actuelle (celle du paysan). On appelle **parcelles élémentaires** : les placeaux caractérisés par leurs dimensions (longueur et largeur) sur lesquels on applique les différents traitements. Comme on verra plus loin, les parcelles élémentaires sont disposées côte à côte dans des **blocs** comprenant chacun une fois tous les traitements. Le traitement appliqué sur une parcelle peut avoir un effet sur les parcelles contigües et en altérer le résultat ; par exemple, la fumure forte apportée sur une parcelle peut modifier à ses marges la production d'une parcelle voisine ne recevant pas ou peu d'engrais, les racines des lignes de bordure de cette dernière allant se nourrir dans la précédente. C'est pourquoi on élimine avant récolte les lignes de bordure de chaque côté et aux deux extrémités de la parcelle élémentaire ; ce qui reste pour évaluer la production est la **parcelle utile** (voir figure 4.1).

Revenons à la population des N parcelles élémentaires dont le rendement est une variable aléatoire qui suit la loi normale. Cette variable aléatoire, notée x_i , avec i compris entre 1 et N (pour N parcelles), est caractérisée par la moyenne de ses N valeurs x_i : **moyenne $\mu = \text{Somme des } x_i / N$** et la dispersion des N valeurs autour de cette moyenne μ ; pour des raisons pratiques de calcul, les statisticiens ont décidé d'utiliser, plutôt que les écarts simples à la moyenne ¹⁷, le carré de ces écarts à la moyenne σ^2 , appelé **variance** :

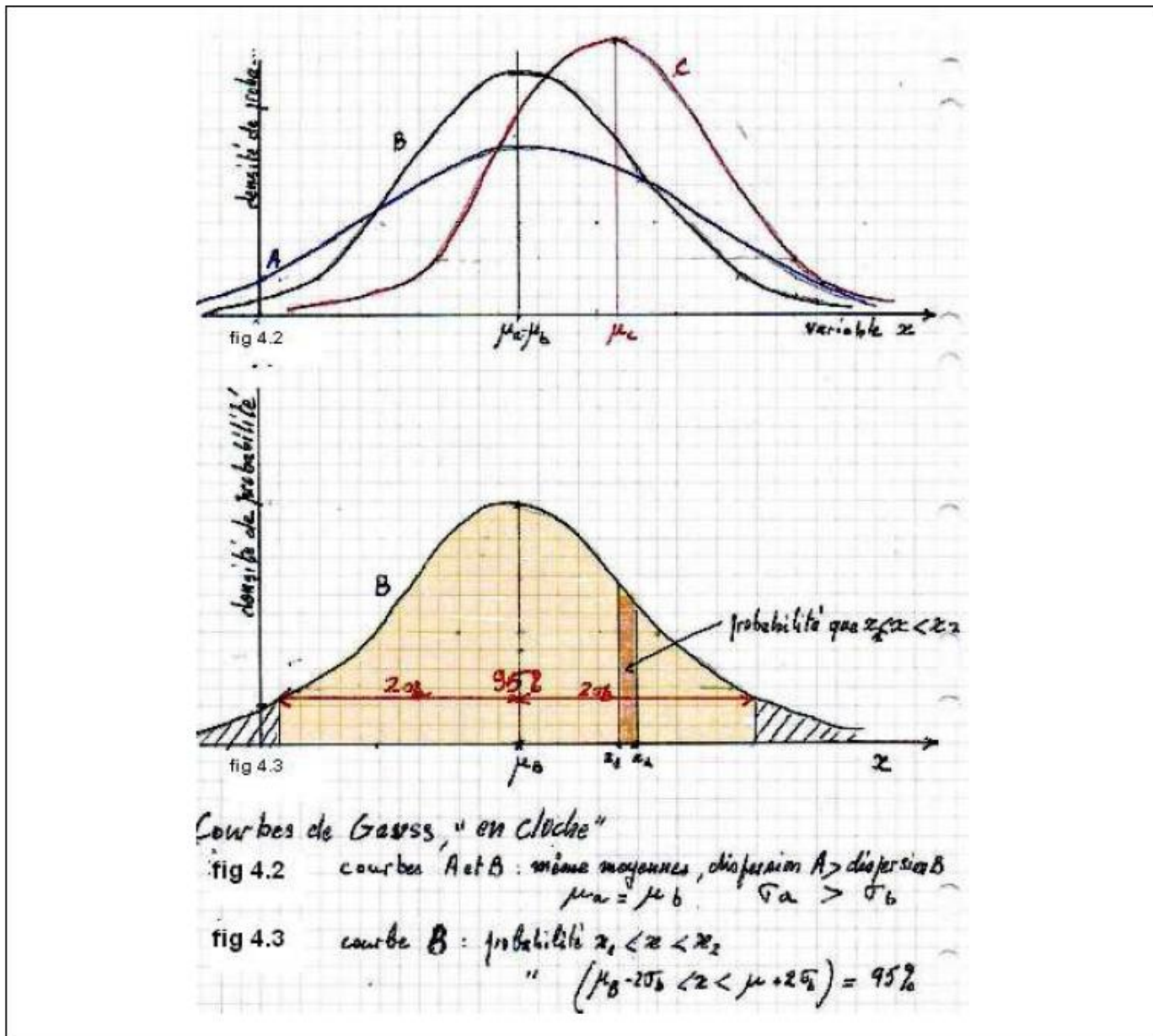
$$\sigma^2 = \text{Somme des } (x_i - \mu)^2 / N$$

l'écart-type σ est la racine carrée de la variance : $\sqrt{\sigma^2}$.

Toute loi normale est entièrement définie par sa moyenne et son écart-type et peut être ramenée à la forme type de la loi normale réduite de moyenne nulle et de variance égale à l'unité (1) ; on l'obtient par un changement de variable sur l'axe des abscisses avec la moyenne pour origine et l'écart-type pour unité.

¹⁷La somme des écarts à la moyenne est nulle (par définition de la moyenne), elle n'a donc pas la possibilité de représenter la moyenne des écarts.

Figures 4.2 et 4.3 courbes de Gauss



Equation de la loi normale

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

avec μ (espérance mathématique et σ (écart-type)

Dans les figures 4.2 et 4.3 sont représentées des courbes de Gauss, dites courbes en cloche, à cause de leur allure. Elles représentent la fonction de **densité de probabilité** pour la loi normale. Ces courbes sont symétriques par rapport à la valeur moyenne de la variable (ici le rendement par exemple) et plus ou moins aplaties selon la plus ou moins grande dispersion de la variable autour de la moyenne (figure 4.2). En principe, la courbe correspond à une infinité de valeurs et s'étend à l'infini de part et d'autre de la moyenne ; en pratique, elle est valable quand le nombre N de valeurs est grand, **dés que $N > 30$ estime-t-on.**

Sur la figure 4.3, la surface hachurée, limitée par l'axe des abscisses et la courbe entre deux valeurs x_1 et x_2 , représentant l'intégrale de la courbe de Gauss, est la probabilité que la variable aléatoire x soit comprise entre x_1 et x_2 . La surface incluse entre la courbe et l'axe des abscisses de moins l'infini ($-\infty$) à plus l'infini ($+\infty$) est, bien entendue, égale à 1 (certitude que tous les événements possibles arrivent).

La théorie montre que 95% des x_i sont compris dans l'intervalle : $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$; d'où, évidemment, x_i n'est inférieur à $\mu - 2\sigma$ ou supérieur à $\mu + 2\sigma$ que dans 5% des cas (voir figure 4.3). **Les conclusions des calculs statistiques utilisés ci-après sont fondées de façon indirectes sur ce constat.**

4.3 Estimation des paramètres de la loi normale.

Les caractéristiques : moyenne μ et la variance σ^2 de la loi normale qui « résument » les rendements des parcelles ne sont pas connues a priori ; elles ne peuvent et doivent être estimées qu'à partir d'échantillons pris au hasard ; plus grand est l'échantillon, meilleures seront les estimations. Les estimations les plus rationnelles de la moyenne et de la variance de la population à partir d'un échantillon de N individus sont :

- pour la moyenne : celle de l'échantillon lui-même : **\bar{x} = somme des x_i/N ,**
- pour la **variance : s^2 = somme des $(x_i - \bar{x})^2/N-1$.**

Pourquoi N-1 et pas N ? : c'est la question des degrés de liberté, des considérations théoriques ont conduit les statisticiens à utiliser N-1 au lieu de N, considérant que c'est le véritable nombre de choix dont on dispose pour déterminer les N valeurs d'une variable dont on connaît la moyenne (en effet quand on a choisi N-1 valeurs ; la dernière, la $N_{\text{ième}}$ ne peut être que la différence entre N fois la moyenne et la somme des (N-1) valeurs déjà retenues.

Quand la variable x_i suit une loi normale, on peut faire de nombreuses estimations indépendantes et non identiques de sa variance à partir de différents échantillons de n quelconques individus pris au hasard : soit la variance estimée : $s^2 = \text{Somme } (x_i - \bar{x})^2 / n - 1$. L'estimation de la variance peut aussi se faire à partir d'échantillons comprenant un nombre n' d'individus différents de n et $s'^2 = \text{Somme } (x_i - \bar{x})^2 / n' - 1$.

Il a été démontré que la valeur du rapport **$F = s^2 / s'^2$** de deux estimations indépendantes de la variance sur des échantillons de n et n' individus, est distribuée selon une loi de probabilité qui dépend de n et n' . Les valeurs de ce rapport dont la probabilité d'être dépassée est inférieure ou égale à 5% sont données dans une **table à double entrée, dite de Snedecor** (ou « table de Fisher-Snedecor » en annexe 4.2). Les colonnes correspondent au nombre de degrés de liberté de s, soit (n-1) ; les lignes correspondant au nombre de degrés de liberté de s' , soit ($n'-1$) ; la valeur de F se lit à l'intersection des lignes et des colonnes correspondantes.

4.4 Les principes de base de l'expérimentation au champ.

Les méthodes d'expérimentation au champ, quand on veut évaluer des différences entre traitements, ont pour premier but d'éliminer autant que possible les causes contrôlables de variations : variété, préparation du sol ... qui brouillent les effets des traitements, et réduire l'incidence des facteurs non contrôlables comme l'hétérogénéité du sol.

Éliminer autant que possible les causes contrôlables en adoptant des techniques culturales identiques pour tous les autres facteurs que ceux étudiés : même variété, même date de semis (quand on connaît l'importance que peut avoir la pluviosité sur le développement et finalement la production de la plante, on comprend qu'il soit indispensable d'effectuer chaque opération culturale le même jour sur l'ensemble d'un essai¹⁸), même fumure pour les éléments non étudiés (mêmes apports de P et de K dans un essai sur des apports d'azote par exemple).

Réduire l'incidence par les répétitions, et, ce qui est propre à cette expérimentation de plein champ, en essayant de prendre en compte la principale source d'aléas : l'hétérogénéité du terrain. Les placeaux des k répétitions des traitements en comparaison sont dans le dispositif le plus élémentaire répartis entièrement au hasard sur le terrain d'essai ; à ce dispositif, le plus élémentaire, est associé le modèle mathématique le plus simple, voir le prochain §, ce dispositif n'est pas utilisé en agronomie ayant le double désavantage, par rapport aux blocs de Fisher :

- d'être moins facile à mettre en place sur le terrain et moins pratique à contrôler par la suite.
- de ne pas améliorer la sensibilité de l'essai de façon parfois arbitraire en diminuant le terme de l'erreur dans l'analyse (voir § suivant).

Dans un dispositif plus élaboré, les répétitions sont regroupées en « blocs » comprenant tous les traitements, chacun une fois ; les blocs sont aussi compacts que possibles (on suppose que la différence de fertilité de deux placeaux peut être d'autant plus grande qu'ils sont éloignés). D'autre part, les blocs sont échelonnés selon le supposé gradient de la fertilité de la parcelle (en pratique le plus souvent : la pente) pour que chaque bloc soit le plus homogène¹⁹, sans qu'il y ait de grandes différences de nature des sols entre eux (voir Figure 4.1). Les blocs sont des répétitions d'un genre particulier, équivalent à un facteur contrôlé.

La recherche de compacité²⁰ des blocs conduit à allonger les parcelles dans le sens de la pente ce qui a en plus pour conséquence de mieux répartir le gradient de fertilité.

Les traitements doivent être distribués au hasard, « randomisés », dans chacun des blocs pour éviter tout biais systématique dû à un possible autre gradient de fertilité.

¹⁸ Au pire, on s'arrêtera à la fin d'un bloc si pour une raison de temps, on ne peut finir l'opération le même jour sur l'ensemble de l'essai ; s'il en résulte un effet entre blocs, retard à la levée pour des semis décalés par exemple, il sera inclus dans l'effet bloc.

¹⁹ Un gradient de fertilité ne saute pas toujours aux yeux : la compacité des blocs est alors la justification de leur supposée homogénéité.

²⁰ On ne peut avoir de bloc vraiment compact que si les traitements sont peu nombreux.

On vient d'exposer ce qui est le plan d'expérience du dispositif de base en expérimentation agronomique : le plan en blocs simples complets, dit en blocs de Fischer dans lequel tous les traitements comparés, au nombre de n , sont représentés dans chacun des k blocs ; soit au total l'essai comprend $N = n k$ placeaux ou parcelles élémentaires.

4.5 Le modèle mathématique associé au plan d'expérience et l'analyse des résultats avec un test de comparaison des variances. Cas où un seul facteur est étudié, exemple de l'essai LCTA.

4.5.1 Un dispositif²¹ à proprement parler comprend deux composantes :

- le plan d'expérience : c'est-à-dire l'agencement des parcelles sur le terrain (ce que nous venons de voir) et
- le modèle mathématique : équation donnant les composantes de la variable aléatoire; il servira de guide à l'analyse statistique des résultats. Le modèle le plus simple, quand les traitements ne concernent qu'un seul facteur, est le modèle linéaire²² dans lequel on considère que les effets des traitements et des blocs sont additifs et indépendants, c'est-à-dire que l'effet des traitements est semblable sur tous les blocs²³. On postule qu'il n'y a pas d'« interactions » entre traitements et blocs (voir plus loin) ; l'interaction est alors assimilée à l'erreur résiduelle.

$$x_{ij} = \bar{x} + a_i + b_j + e_{ij} \quad (24) \text{ (équation 1)}$$

où : x_{ij} = la production de la parcelle élémentaire portant le $i_{\text{ème}}$ traitement dans le $j_{\text{ème}}$ bloc,

\bar{x} = le rendement moyen des $N = nk$ parcelles,

a_i = l'effet du $i_{\text{ème}}$ traitement,

b_j = l'effet du $j_{\text{ème}}$ bloc,

e_{ij} est un terme résiduel (improprement désigné sous le terme d'erreur) somme des effets des facteurs incontrôlés non identifiés et de l'interaction supposée négligeable entre les traitements et les blocs.

²¹ Remarque : on utilise aussi, en pratique et de façon abusive sur le terrain le terme « dispositif » pour parler de l'agencement des parcelles ainsi que pour certaines combinaisons particulières des traitements (soustractif, courbe de réponse, voir plus loin...)

²² Exemples d'essais dont les traitements ne sont que de simples modalités d'un même facteur : variétés (de sorgho, ou de maïs ...), ou différents produits phytosanitaire (insecticides ou fongicides) ou herbicidesou encore pour les engrais : différentes formes d'apports d'un même élément (divers phosphates pour P par exemple).

²³ Ce qui est à priori vraisemblable quand les blocs sont proches les uns des autres, les différences de fertilité entre eux ne sont pas telles, à priori, pour que l'effet des traitements n'y soit pas semblable. Cependant, un terme résiduel important (et donc un coefficient de variation élevé) est souvent le signe d'une interaction traitements x blocs, on a intérêt à regarder de plus près la nature du sol des différents blocs (horizon cultural plus ou moins profond selon la situation sur la pente, passé cultural ...); on est peut-être sur des sols différents du point de vue agronomique.

²⁴ Quand les répétitions ne sont pas regroupées en blocs, l'équation est réduite à : $x_{ij} = a_i + e_{ij}$.

Etapes des calculs :

On remplit le tableau 4.1 à double entrée page suivante, par traitement et bloc avec la production des parcelles utiles : il peut arriver que, pour une raison accidentelle, une des mesures fasse défaut, on parle de **parcelle manquante**. Il faut alors en faire une estimation par la formule :

$$z = [k X'_B + n X'_T - X'] / (k-1)(n-1)$$

où : k et n désignent le nombre de blocs et de traitements

X'_B le total incomplet relatif au bloc de la donnée manquante

X'_T le total incomplet relatif au traitement de la donnée manquante

X' le total incomplet des mesures

Les logiciels disponibles peuvent estimer plusieurs valeurs manquantes.

Tableau .4.1 : tableau à double entrée traitements x blocs.

traitements	T1	T2	..	Ti	Tn	Somme Blocs
blocs								
B1	X11			Xi1			Xn1	X.1
Bj	X1j			Xij			Xnj	X.j
Bk	X1k			Xik			Xnk	X.k
Somme Traitements	X1.			Xi.			Xn.	X..
Moyenne Trait.	X'1			X'i			X'n	\bar{x}'

On démontre que la somme des carrés (SC) des écarts totale : $\sum (x_{ij} - \bar{x}')^2$ est égale à la SC due aux traitements : $\sum (x_{i.} - \bar{x}')^2$ + la SC due aux blocs : $\sum (x_{.j} - \bar{x}')^2$ + une SC résiduelle due à l'influence des facteurs incontrôlés :

$$\text{SC totale} = \text{SC traitements} + \text{SC blocs} + \text{SC résiduelle} \quad (\text{équation 2})$$

La façon de calculer la SC totale, puis les SC traitements et SC blocs par la méthode des moindres carrés, de manière à minimiser la SC résiduelle, est illustrée dans l'annexe 4.1 « Analyse des résultats de l'essai LCTA ».

La SC résiduelle est obtenue par différence à partir de l'équation 2. On en déduit, avec les degrés de liberté attribuables à chaque terme : nk-1 pour la SC totale, n-1 pour la SC des traitements, k-1 pour la SC des blocs, et (n-1)(k-1) pour la SC résiduelle ²⁵, les variances :

$$\text{Totale} = \text{SC totale} / nk - 1$$

$$\text{due aux traitements} = \text{SC traitements} / n - 1$$

$$\text{due aux blocs} = \text{SC blocs} / k - 1$$

²⁵ On note que : nk-1 = (n-1) + (k-1) + (n-1)(k-1)

$$\text{Résiduelle} = \text{SC résiduelle} / (n-1)(k-1)$$

Les trois dernières SC sont des estimations indépendantes de la variance totale. Sont-elles significativement différentes ? Si ce n'est pas le cas, on estimera qu'elles sont toutes assimilables à des estimations acceptables de l'erreur et on considèrera qu'il n'y a pas d'effet des traitements et/ou des blocs, sinon on considère qu'il y a un effet des traitements et/ou des blocs. Pour en juger, on effectue un test de comparaison des variances dues aux traitements ou aux blocs à la variance résiduelle.

4.5.2 : Test de comparaison de variances, Loi de F de Fisher-Snédecor.

Selon ce que nous avons vu au § 4.3 pour une variable aléatoire qui suit la loi normale, les rapports : variance traitements/variance résiduelle noté F1 et variance blocs /variance résiduelle, noté F2, sont distribués suivant une loi de Fisher-Snédecor dépendant du nombre de degrés de liberté de la variance des traitements (n-1) ou des blocs (k-1) d'une part, et du résidu (n-1)(k-1) d'autre part.

Les valeurs théoriques de F ayant la probabilité 0.05 et 0.01 d'être dépassées sont données dans les tables à l'intersection des colonnes (n-1) ou (k-1) pour les numérateurs et des lignes (n-1)(k-1) pour le dénominateur. Selon que les F observés seront supérieurs ou non aux F théoriques donnés par la table, on estimera que les effets des traitements et/ou des blocs sont significatifs ou non.

Si le rapport calculé des variances est supérieur à celui donné par la table (rapport théorique) on déduira (inférera) que ce n'est pas dû au hasard, mais aux traitements et/ou blocs, avec un risque d'erreur de 5% dit de 1^{ère} espèce : acceptation d'un effet qui n'existe pas ; s'il reste dans l'intervalle, on considère que sa valeur relève du hasard (hypothèse nulle : le traitement n'a pas d'effet) avec un risque d'erreur de 5%, dit de 2^{ème} espèce : rejet d'un effet réel.

Tableau 4.2 des risques d'erreurs de 1^{ère} et 2^{ème} espèce dans les conclusions :

Test statistique	Pas d'effet du traitement	Effet du traitement
Hypothèse nulle ²⁶ rejetée	Risque de 1 ^{ère} espèce	OK
Hypothèse nulle acceptée	OK	Risque de 2 ^{ème} espèce

Pour améliorer la sensibilité d'un dispositif, on cherchera à obtenir des $F_{\text{Observés}}$ aussi grands que possible, donc :

- d'une part, à majorer leur numérateur (variance des traitements ou des blocs), et pour cela minimiser le nombre de ses dl : c'est ce que l'on obtient avec les dispositifs à contrastes orthogonaux (voir § 4.6)
- d'autre part, à minorer le dénominateur (variance du résidu) en augmentant le nombre de ses (n-1)(k-1) dl : c'est-à-dire : « n » le nombre de traitements et/ou k le nombre de blocs (les répétitions). Cela ne sera pas sans conséquences pratiques, car

²⁶ Hypothèse nulle : les tests sont construits sur l'hypothèse nulle selon laquelle : il n'y a pas de différence entre les objets (traitements et/ou blocs)

cela implique l'augmentation de la surface de l'essai et donc son coût et des difficultés de le mener à bien. Il y a un compromis à trouver sur les valeurs de n et k et une taille acceptable de l'essai.

Quoi qu'il en soit : ni n, ni k, ne peuvent être inférieurs à deux :

- soit deux traitements dont un témoin, avec d'ordinaire huit répétitions, on parle d'essai-couple ; on les signale pour mémoire, ils ne sont pas adaptés à la complexité des problèmes de fertilité et par ailleurs peu sensibles.
- soit deux répétitions d'un nombre quelconque de traitements, c'est un dispositif trop peu sensible pour être utilisé en station, mais assez courant en points d'essais multiloaux ou en champ paysan ; on y reviendra dans le prochain chapitre.

La situation extrême est celle de 2 répétitions de 2 traitements que l'on ne peut considérer comme un essai, mais qui peut convenir aux tests en milieu paysan répétés en plusieurs sites pendant plusieurs années (voir § 5.5)

Revenons sur notre exemple pédagogique de l'essai LCTA à 5 traitements pris comme modalités (ou niveaux) d'un même facteur (voir les rendements pour chaque parcelle élémentaire dans le tableau 4.3 et l'interprétation sur la figure 4.4)

Tableau 4.3: rendements parcellaires de l'essai **LCTA**

Traitements	bloc 1	bloc 2	bloc 3	bloc 4	total	moyenne	moyenne générale
(T0) Témoin sans engrais	3.98	3.88	3.75	3.59	15.2	3.8	
(T1) 100 kg d'urée	5.07	4.95	4.86	5.08	19.96	4.99	
(T2) 2-3 t de tourteau de coton	4.92	4.98	4.78	5.15	19.83	4.95	
(T3) 100 kg d'engrais coton	5.14	5.09	5.43	5.38	21.04	5.26	
(T4) 3 t de poudrette de parc	5.21	5.4	4.98	5.01	20.6	5.15	4.84

Le processus complet de leur analyse statistique à partir du tableau à double entrée des rendements parcellaires par traitement et bloc avec calcul des sommes et des moyennes, puis les calculs des sommes des carrés et des variances jusqu'aux tests F concernant les résultats, sont reportés dans le tableau 4.1.3 de l'annexe 4.1 « Analyse des résultats de l'essai LCTA » et résumés dans le tableau 4.4 dit d'analyse de la variance.

Tableau 4.4 : analyse de variance de l'essai LCTA

Origine de la variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Variances	F calculé	F théorique dans la table	
					5%	1%
Total	SC total=5.949	$nk-1=19$				
Traitement	SC trait=5.584	$n-1=4$	SC trait/4 = 1.396	49.217	$F^4_{12}=3.26$	5.41
Bloc	SC bloc=0.024	$k-1=3$	SC bloc/3 = 0.008	0.28	$F^3_{12}=3.49$	5.95
résiduelle	SC résidu=0.340	$(n-1)(k-1)=12$	SC rési/12= 0.028			

Le F calculé dû aux blocs est inférieur au F théorique à 5%, on considère qu'il n'y a pas de différences entre blocs.

Le F calculé dû aux traitements est très largement supérieur au F théorique à 1%, on considère qu'il y a des différences hautement significatives entre les productions des traitements.

Le coefficient de variation (CV) qui caractérise la précision de l'essai est défini comme :

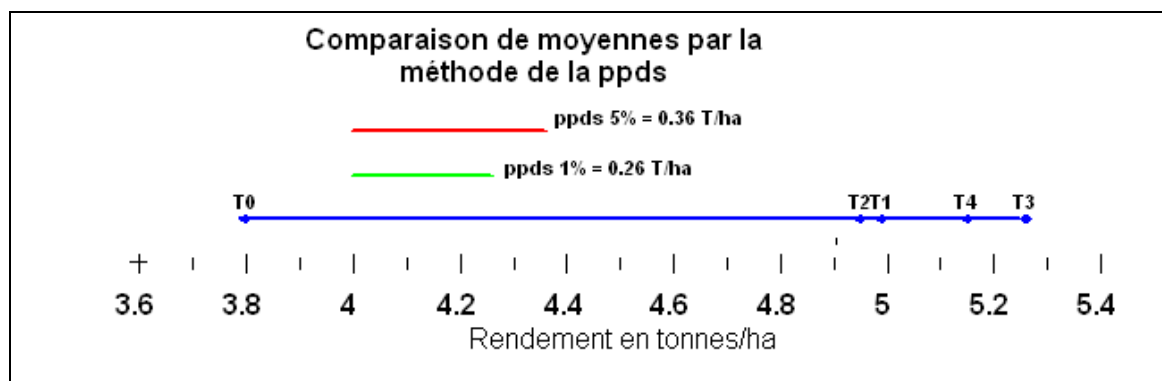
$CV = \text{écart-type} / \bar{x} \times 100$ soit ici $(\sqrt{0.028}) / 4.84 \times 100 = 3,46 \%$ ce qui est exceptionnel ; on considère qu'un CV de 10 et même de 15% est acceptable dans des conditions difficiles dans lesquelles on travaille dans la région.

Reste à juger quels traitements sont différents de quels autres.

4.5.3 : Tests de comparaison des moyennes, plus petite différence significative (ppds) entre traitements...

Dans le cas où le test de comparaison des variances indique une action très probable des traitements (avec un risque d'erreur de 5%), ce qui est le cas ici, il reste à déterminer parmi les traitements lesquels sont différents entre eux. On le détermine par plusieurs méthodes probabilistes dont la plus communément utilisée, souvent improprement, est celle de la plus petite différence significative (ppds) qui est une fonction de la variance résiduelle et de la variable «t» de Student-Fisher, voir figure 4.4 et annexe 4.3 « Calcul de la ppds et distribution «t» de Student ».

Figure 4.4 : Les rendements moyens de l'essai LCTA :



On calcule des intervalles de confiance à 1 % et 5 % que l'on compare aux intervalles entre deux moyennes. Mais cette ppds ne vaut que pour les traitements adjacents, elle doit être remplacée pour les traitements non adjacents par des tests similaires mieux adaptés selon le type d'essai :

- test de Dunnett quand on compare tous les traitements à un même témoin (cas des tests de nouvelles variétés par rapport à la variété vulgarisée).
- test de Newman-Keuls ou de Duncan pour les autres essais en général.

Les logiciels se chargent très bien des calculs, il suffit de préciser le test souhaité. Dans notre cas de l'essai LCTA, il est possible de conclure avec la seule ppds égale à 0,26 T/ha (voir annexe 4.3) que :

- le témoin sans engrais est inférieur à tous les autres traitements avec un risque

d'erreur de 1%

- les traitements T_2 et T_3 sont identiques et équivalents, T_4 et T_5 sont, eux mêmes équivalents ; la ppds 5% = 0.36 T/ha chevauchant ces 4 traitements, on doit considérer qu'il n'y a pas de différence significative entre eux, qu'ils sont donc équivalents.

4.6 Essais avec plusieurs facteurs, concept d'interaction entre ces facteurs ; avantages des dispositifs factoriels.

4.6.1 : cas le plus simple, le factoriel 2^2 (ou 2×2):

Reprenons l'exemple de la fumure du sorgho derrière coton, qui en principe ne reçoit que de l'azote, faudrait-il apporter un complément en phosphore P ou en potasse K ? ou les deux à la fois ? Un simple apport de P et K, dans un traitement TPK à opposer à un témoin T00 ne permettra pas de tester s'il faut apporter les deux ensembles ou si un seul des deux est efficace : la simple comparaison de TPK au témoin T00 n'est donc pas vraiment satisfaisante. On sera conduit à inclure dans l'essai les 2 traitements TP0 et T0K qui par comparaison avec T00 montreront si l'apport de P et/ou K est efficace seuls ; ce qui n'est pas forcé si l'un des deux éléments est ici **un premier facteur limitant** :

TP0-T00 => effet de P s'il peut se manifester en l'absence de K (K n'est pas un facteur limitant), par contre l'effet de P est nul ou non significatif **si K est un sérieux facteur limitant** et qu'il y a donc **« interaction »** de l'apport de K sur l'effet de P. De même, T0K-T00 ne donne pas une réponse unique. Il faut toujours disposer du traitement TPK pour faire face à toutes les éventualités.

On se retrouve alors avec les 4 traitements constitutifs de ce que l'on appelle un dispositif factoriel 2×2 (ou 2^2), soit les 4 combinaisons de 2 facteurs à 2 niveaux chacun (ici absence ou présence d'un élément), que l'on peut formuler en faisant abstraction de **l'apport uniforme d'azote** :

$$(0, P) \times (0, K) = 00, P0, 0K, \text{ et } PK.$$

Soit quatre traitements à partir desquels on pourra évaluer sans ambiguïté s'il y a un effet de P et /ou de K avec ou sans interaction.

Tableau 4.5 : Coefficients affectés aux comparaisons « orthogonales »²⁷

traitements	T0 (0, 0)	TP (0, P)	TK (0, K)	TPK (P, K)	explications
Effet de P	-1	+1	-1	+1	+1 dans le traitement où apparaît l'effet, sinon, -1
Effet de K	-1	-1	+1	+1	
Interaction PK	+1	-1	-1	+1	Produit des coef. 2 à 2

²⁷ Terme du jargon mathématique signifiant qu'elles sont indépendantes les unes des autres

Les coefficients attachés à l'interaction s'obtiennent en multipliant colonne par colonne les coefficients des deux lignes supérieures : $-1 \times -1 = 1$, $+1 \times -1 = -1$,...

On note bien que :

1) la somme des coefficients sur la même ligne est nulle

2) la somme des produits des coefficients d'un même traitement sur deux lignes quelconques est nulle.

C'est une règle générale : les deux conditions doivent être respectées pour légitimement décomposer l'effet global des traitements, ici au nombre de 4 donc avec 3 dl, en autant de comparaisons orthogonales chacune à 1 dl qu'il y a de dl totaux : ici : 1 dl pour l'effet de P, 1 pour l'effet de K et 1 pour l'interaction PK, soit bien 3dl. (Voir CD rom chap.4 « Calcul des coefficients orthogonaux »)

S'il n'y a pas d'interaction, les comparaisons : TPK-TP et TK-T0 sont équivalentes ainsi que TPK-TK et TP-T0, ce qui correspond au doublement du nombre de répétitions. On parle de répétitions apparentes, un des avantages des dispositifs factoriels.

Le modèle mathématique de la variable est : $x_{ij} = \bar{x} + a_i + c_s + ac_{is} + b_j + e_{isj}$

où \bar{x} : moyenne générale

a_i représente l'effet du 1^{er} facteur (ici P)

c_s représente l'effet du 2^{ème} facteur (ici K)

ac_{is} représente l'effet de l'interaction (ici P x K)

b_j représente l'effet bloc

e_{isj} représente le résidu

Dans notre cas élémentaire, i et s prennent les valeurs 1 et 2 pour les traitements et j, pour les blocs, prend celles de 1 à 4 (4 répétitions).

La formule initiale de la somme des carrés : SC total = SC trait + SC bloc + SC résidu devenant après décomposition de l'effet traitement à 3dl en 3 effets à 1 dl:

SC total = SC phosphore + SC potasse + SC inter PK + SC bloc + SC résidu

avec 15 dl 1 dl 1 dl 1 dl 3 dl 9 dl

Tableau 4.6 : schéma de l'analyse de variance de l'essai PK, 2x2 (2 facteurs P et K avec 2 niveaux : présence, absence), 4 répétitions ou blocs.

origine de la variation	Somme des carrés	Nombre de degrés lib	variance	F _{observé}	F _{théorique} 5%
Totale		15			
Traitements	SC total	3			$F_9^3 = 3.86$
Phosphore	SC phosphore	1	SC phosphore/1	var phospo/var res	$F_9^1 = 5.12$
Potasse	SC potasse	1	SC potasse/1	var potasse/var res	Id.
interaction	SC interaction	1	SC interaction/1	var interact /var res	Id.
Blocs	SC blocs	3	SC blocs/3	Var bloc/var res	$F_9^3 = 3.86$
Résiduelle	SC résidu	9	SC résidu/9		

4.6.2 : Essais factoriels plus complexes.

Le plus simple d'entre eux est le très classique NPK à deux niveaux (0, 1) dont le témoin zéro pour chacun de ces 3 éléments majeurs, il comprend donc 2^3 : soit 8 traitements. Il a été très utilisé au cours de la première période d'expérimentation sur les engrais dans les pays tropicaux et jusqu'à récemment dans les enquêtes de fertilité de la FAO en milieu paysan, dans ce cas sans répétitions (voir § 5.3.3) et avec 2 répétitions seulement par l'IRCT/CIRAD (H. Suzor).

Tableau 4.7 : Coefficients des contrastes orthogonaux d'un essai 2^3

Trait ^t Effet	000	N00	0P0	00K	NP0	N0K	0PK	NPK
N	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1
P	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1
K	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1
Inter NxP	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
Inter NxK	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
Inter PxK	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
Inter NPK	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1

On le présente en général par le produit : (N-0)x(P-0)x(K-0) engendrant les 8 combinaisons :

000, N00, 0P0, 00K, NP0, NK0, 0PK, NPK

Les 7 dl attachés aux traitements (8-1) sont distribués en 7 contrastes orthogonaux avec : 1 dl pour l'effet de chacun des engrais, 1 dl pour chacune des interactions simples NP, NK, PK et 1 dl pour l'interaction complexe NPK.

Les essais à plus de 3 facteurs et chacun à plus de 2 niveaux²⁸, de 3 à 5 en général, comprennent vite un grand nombre de traitements. Ils sont difficiles à mettre en place, puis à conduire. Avec seulement 2 facteurs : les factoriels 4N x 3P ou 4N x 4P, avec ou sans fumure K uniforme, comptent déjà 12 et 16 traitements, avec 3 facteurs (NPK par ex à seulement 3 niveaux), on compte déjà 27 traitements, on parle d' « **explosion factorielle** ». En outre, ils ne présentent pas de grand intérêt dans la situation du Tchad dans l'état actuel de nos connaissances.

L' « **explosion factorielle** » a conduit à utiliser des dispositifs en blocs incomplets pour réduire le nombre de traitements, ces dispositifs sont très sophistiqués, délicats à maîtriser et à interpréter ; ils sont « fragiles » ; d'autre part, dans la mesure où pour une raison ou une autre, on se trouve à la récolte avec plusieurs parcelles manquantes ; l'exploitation des données devient très complexe. Ces dispositifs ne sont pas appropriés aux conditions locales.

4.6.3 : Les dispositifs orthogonaux non strictement factoriels, exemple essai LCTB

Les dispositifs factoriels complets sont par nature orthogonaux, mais ce ne sont pas les seuls, il suffit que leurs comparaisons entre traitements respectent les deux règles énoncées plus haut. Le dispositif LCTB en est un exemple classique. Les résultats par parcelle utile, les mêmes que pour LCTA –voir tableau 4.3 – sont reproduits ci-dessous au regard des nouveaux traitements :

Tableau 4.8 : rendement par parcelle en tonnes de grains/ha avec les nouveaux traitements où N=45P=30 P₂O₅ et K=30 K₂O ;

Traitements	bloc 1	bloc 2	bloc 3	bloc 4	total	moyenne	moyenne générale
(T0) = 000	3.98	3.88	3.75	3.59	15.2	3.8	
(T1) = N00	5.07	4.95	4.86	5.08	19.96	4.99	
(T2) NP0	4.92	4.98	4.78	5.15	19.83	4.95	
(T3) N0K	5.14	5.09	5.43	5.38	21.04	5.26	
(T4) NPK	5.21	5.4	4.98	5.01	20.6	5.15	4.84

L'analyse de variance exploitant les contrastes orthogonaux entre les traitements s'effectuera avec les coefficients ci-après

Tableau 4.9 : contrastes et coefficients associés. (Soit 5 traitements décomposés en 4 contrastes)

Contrastes/Trait.	000	N00	NP0	N0K	NPK
Effet de N	-4	+1	+1	+1	+1
Effet de P	0	-1	+1	-1	+1
Effet de K	0	-1	-1	+1	+1
Interaction PK	0	+1	-1	-1	+1

²⁸ Voir exemples de contrastes pour différents dispositifs dont factoriels et courbes de réponse : CD rom chap. 4 : « Annexe statistique : réduction de données brutes, ... » p. 6 et suivantes.

L'analyse statistique complète est reportée sur le CD rom chap. 4 « Annexe statistique, réduction des données brutes, inférence statistique et tests d'hypothèses » p. 4 et 7) dont on a extrait le tableau d'analyse de la variance ci-dessous :

Tableau 4.10 : analyse de variance de LCTB

Origine de la variation	S.C	dl	Variance	F calculés	F théorique 5% 1%		signification
Totale	5,95	19					
blocs	0,02	3	0,008	0,28	3,49	5,95	
Traitements	5,58	4	1,396	49,16	3,26	5,41	H.S.*
Effet Azote	5,37	1	5,37	188,96	4,75	9,33	H.S.
Effet Potasse	0,19	1	0,19	6,82	"	"	S.**
Effet Phosphore	0,015	1	0,015	0,51	"	"	N.S.***
Interaction PK	0,01	1	0,01	0,35	"	"	N.S.
Résiduelle	0,34	12	0,028				

* : hautement significatif au seuil de 1% ; ** significatif au seuil de 5% ; Non significatif

On vérifie que SC traitements (à 4 dl) est égal à la somme des SC des contrastes (à 1 dl).

Ces comparaisons ou contrastes peuvent paraître parfois artificiels, ainsi l'essai LCTA peut être vu avec trois catégories de traitements : le témoin T0 plus deux traitements avec fumure strictement minérale (FM) à savoir T1 (urée) et T3 (engrais coton) et deux traitements avec fumure strictement organique (FO) : T2 (tourteau de coton)²⁹ et T4 (poudrette) (voir § : 4.1), ce qui justifierait la décomposition suivante :

Contrastes /Trait.	T0 (00)	T1 (FM1)	T2(FO1)	T3(FM2)	T4(FO2)
non fumure/fumure	-4	+1	+1	+1	+1
fum.Min./fum.Org.	0	+1	-1	+1	-1
fum.Min.2/fum.Min.1	0	-1	0	+1	0
fum.Org.2/fum.Org.1	0	0	-1	0	+1

Commentaires : le respect des règles concernant les coefficients (voir §4.6.1) suffit à légitimer les contrastes, mais également à mieux construire le protocole comme le rappelle Michel Lecompt :

« La « mise en équation » du protocole en symbolisant les questions posées dans un essai par des signes + et -, est un exercice extrêmement profitable parce qu'il évite de mettre en place des essais dont on tirera peu de renseignements à cause d'un protocole mal construit. Cette mise en équation n'est généralement pas difficile quand le protocole est bien conçu. » .

Chapitre 5 : Pratique de l'expérimentation au champ

5.1: Analyse du problème complexe à traiter, réduction à des questions simples :

La 1^{ère} partie de l'atelier était consacrée à un rappel des connaissances que tout chercheur et technicien doivent maîtriser avant d'envisager de faire des essais sur la fertilité des sols dans une région quelconque : bonne connaissance de la zone, de ses sols, de son climat, de ses cultures et des problèmes qui s'y posent. Habituellement, elles ont été identifiées depuis plus ou moins longtemps par les chercheurs seniors de la génération précédente ; ils ont dû les transmettre à leurs successeurs par leurs publications et ...oralement. L'accumulation des acquis pourrait être idéalement rassemblée dans des **synthèses régionales, des monographies**, périodiquement mises à jour. Ce qui n'est habituellement pas le cas malheureusement. Le jeune chercheur y palliera par une bibliographie méthodique et régulière complétée par « l'appel au savoir des aînés ».

Le travail en équipe sans réticences et la continuité des travaux sont indispensables pour une recherche efficace.

Les travaux et les résultats à ce jour de la Recherche, localement et dans les écologies similaires, doivent rester présents à l'esprit du jeune chercheur ; **ces résultats constituent le socle de nouveaux travaux**. Cela peut être matérialisé dans **un dossier préparatoire** (plus ou moins informel) à l'expérimentation projetée.

Ces acquis comprennent autant que possible un **zonage en régions homogènes** pour les sols et le climat, et une **stratification par rapport aux types d'exploitations** et les moyens dont elles disposent ; des références existent pour le sud du Tchad :

Ngamine J. et al, 1998 « Au Tchad, le projet terroir, exploitation, parcelle : un exemple de collaboration étroite entre la Recherche et le Développement » in Agriculture et développement n° 20 déc. 1998.

Rollin. D ,2000. »Diagnostic sur les systèmes de culture, suivi et analyse des pratiques culturelles , rapport de mission CIRAD au Cameroun et au Tchad »...

Référence pour les stratifications par catégories d'exploitations :

Hauswirth.D, M Naitormbaidé, et al ,2004... »Gestion intégrée des écosystèmes, mode de gestion de la fertilité en zone soudanienne du Tchad ., Banque mondiale - ITRAD.

Le problème général à traiter ici est celui de l'amélioration de la fertilité des sols, au sens large. Il se pose de façons différentes dans le nord et le sud du pays, dans les sols exondés et les plaines inondables, mais les principes de l'expérimentation de plein-champ restent les mêmes.

La recherche bibliographique systématique sur le milieu et les cultures des zones similaires nous apprend qu'un des grands problèmes identifiés est déjà en cours d'étude

pour le résoudre en régions soudaniennes , au Nord Cameroun en particulier, donc dans une écologie très voisine³⁰.

Il s'agit essentiellement du grave appauvrissement du sol en matière organique, de son acidification et de l'épuisement de ses réserves utilisables en K et Mg. Une démonstration partielle en a été faite dans la première partie, par le biais des bilans minéraux³¹.

On pourrait traiter un cas d'école dans son ensemble **comme support pédagogique : celui des sols épuisés des bassins cotonniers**. Le système de culture responsable est celui de la rotation **coton-céréales**³², sans ou avec très peu de jachère et sans apport de fumier³³, dont on sait qu'il a, avec les fumures effectivement apportées, épuisé les sols (cf 1^{ère} partie).

Deux cultures, le coton et le sorgho, seront dans notre cas, les deux **plantes-test** dans l'essai servant de support à l'exposé ; il faudrait encore préciser **en accord avec les sélectionneurs** quelle variété on retiendra dans chaque zone.

Le problème, complexe, met en jeu de nombreux facteurs : niveaux de production attendus, exportation ou restitution des pailles de céréales (dans quel but ? et, possibilités d'enfouissement ?), disponibilité en fumier (et à quelle dose ?) approvisionnement possible en engrais (lesquels ? et à quel prix ?).

Il n'est pas envisageable de traiter l'ensemble dans un seul essai de dimension maîtrisable, c'est-à-dire que l'on puisse conduire sans trop de risques d'échec. Suivant la règle cartésienne le problème doit être décomposé en éléments assez simples faisant chacun l'objet d'un essai de taille raisonnable, l'ensemble étant coordonné par l'existence de **traitements-passerelle qui sont des traitements communs à tous ces essais ; ils permettent de relier entre eux tous leurs résultats**.

L'expérimentation portera sur les économies (restitution ou non des pailles) et les apports complémentaires des deux éléments K et Mg. C'est déjà compliqué : il faut imaginer comment restituer les pailles : les enfouir si on laboure (comment ?) ou les laisser sur place, si on ne laboure pas (problème des éleveurs transhumants ?), ou les utiliser comme fourrage pour les bœufs de l'exploitation, si elle en possède. La restitution se fera alors sous forme de fumier ; dans chaque cas d'ailleurs la « cible » est différente, ce qui implique déjà des essais particuliers pour chaque cible. Mieux vaut se limiter et choisir un problème simple comme exemple : **la fumure minérale phospho-potassique sur sorgho derrière coton**³⁴

³⁰ Plus généralement, il faut dire que les recherches sur la fertilité en zone soudanienne, qui ont commencé il y a une cinquantaine d'année, ont accumulé beaucoup de résultats ; il peut suffire simplement de faire le rapprochement entre le problème qui se pose localement et ceux qui se sont posés dans des situations semblables. Les réseaux régionaux ont été créés pour cela.

³¹ Applications pratiques dans le CD rom annexe chapitre 3 : « Bilan minéral et organique ».

³² Ce système est très intéressant malgré la désaffection actuelle pour la culture du coton pour 2 raisons :
1) c'est un remarquable cas de déséquilibre de bilan de fertilité sur lequel on dispose de données locales,

2) c'est un cas général concernant toutes les zones soudaniennes ; la désaffection actuelle au Tchad n'est, il faut l'espérer, que circonstancielle (problèmes de la CotonTchad) et provisoire.

³³ L'apport de fumier est bien recommandé par la vulgarisation, mais faute de bétail, les agriculteurs ne peuvent en apporter

³⁴ Le test d'une fumure K-Mg serait plus approprié, mais ne s'adapte pas à l'essai LCT. Un essai de fumure complémentaire en K et Mg a d'ailleurs été mis en place cette année (2009-2010) à Bébédjia (M. Naitormbaïdé).

Remarque : Sur les sols moins épuisés du Sud, hors bassins cotonniers, ainsi qu'en zone sahélo-soudanienne où persistent des systèmes traditionnels à base de céréales, avec encore des jachères, le sujet pourrait porter sur l'économie des fumures organo-minérales des céréales.

5.2 Choix des traitements

Une fois le problème cerné, il faut choisir les traitements dont la comparaison permettra de répondre aux questions soulevées :

- d'abord les témoins qui sont les traitements actuels vulgarisés ou effectivement appliqués, mais qui ne sont plus adaptés à la situation actuelle. Le témoin permet de fixer le niveau de départ pour une situation donnée.
- puis les formules avec lesquelles on pense pouvoir résoudre les questions posées.
- parfois des traitements intermédiaires seront utiles pour répondre plus facilement aux questions ou permettre une analyse statistique plus sensible (par le biais de dispositifs « orthogonaux »).

5.2.1: Les témoins : on représente conventionnellement par :

T00 : les témoins absolus, c'est-à-dire ne recevant aucune fumure, c'est la situation représentative d'une certaine catégorie du paysannat.

T0 : les témoins à dose nulle par exemple à l'azote. Ils ne reçoivent pas de N, mais seulement la fumure uniforme PK...de tous les traitements

TV : la fumure actuellement vulgarisée par ex. la fumure-NPKSB sur coton ou un apport d'urée sur la céréale qui le suit :

Tableau 5.1 : exemple d'un essai sur une fumure complémentaire en K (potasse) :

Traitements	Fumures
T00	ne reçoit aucun engrais N0P0K0
T0	reçoit la seule fumure N0 P1K1,
TV (ou T1)	reçoit N1P1K1
T2,	reçoit N1P1K2,
T3,	reçoit N1P1K3
....	reçoit,

Comme on le verra plus loin, c'est un exemple de courbe de réponse, ici à la potasse.

Les traitements témoins, en particulier le traitement actuellement vulgarisé TV, servent en général de « passerelle » entre les essais des différentes spécialités dans une même zone : la sélection variétale, la défense des cultures, les mauvaises herbes ou.... l'agronomie/ fertilité ; ils permettent de relier ces différents essais et de leur donner une cohérence d'ensemble ; le TV est aussi indiqué comme traitement commun aux 3 étages de l'expérimentation régionale sur la fertilité (voir § 5.5).

NB: dans le(s) traitement(s)- passerelle, la variété ainsi que toutes les techniques culturales doivent être les mêmes dans tous les essais. C'est le sujet le plus important de l'indispensable collaboration et du dialogue entre chercheurs pour la cohérence de l'expérimentation dans une zone.

5.2.2 : Les nouveaux traitements et les dispositifs.

Tout dépend de la question posée ; s'agit-il d'identifier une déficience, plus ou moins vraisemblable et soupçonnée (via un DF³⁵ ou des symptômes visuels) ?, ou de rechercher le niveau de correction de celle-ci ? Peut-on s'attendre à des interactions ? On en propose une gamme adaptée aux diverses situations dans les paragraphes sur les dispositifs. Ne pas oublier que le choix d'un dispositif dépend du stade d'avancement de la recherche (exploratoire, confirmation, pré-vulgarisation ?). On présentera comme priorité (les plus usités), les dispositifs en blocs de Fisher les plus usuels retenus pour les questions simples et courantes.

5.3 : Dispositifs simples et pratiques :

On a traité de façon générale et théorique dans le chapitre 4 des essais à un seul facteur et des essais factoriels à plusieurs facteurs avec interactions. On n'y reviendra pas. Il sera maintenant questions de dispositifs pratiques qui furent largement utilisés en Afrique : les essais soustractifs, les courbes de réponse, les tests FAO.

Les deux premiers ont servi à identifier les déficiences en NPK et à déterminer les doses à apporter dans les sols des zones soudaniennes lors des premiers essais de l'IRCT sur coton. Le 3^{ème} est une combinaison originale, mais peu académique des deux précédents.

5.3.1 : les essais soustractifs

Ce dispositif permet l'identification de déficiences en 3 éléments ou plus avec un minimum de traitements en faisant l'impasse sur les interactions entre les éléments.

Recherche des 1^{ers} facteurs limitants.

Le cas le plus simple, essai de base de l'IRCT, est celui des 3 éléments essentiels N, P, et K ; il comprend un traitement avec fumure complète NPK et des traitements avec fumure complète, moins un des éléments soit : NP0, N0K, 0PK, plus un témoin absolu : 000 (encore nommé : T00), soit 5 traitements. Sachant que c'est la règle d'un 1^{er} facteur limitant sévère qui en pratique entraîne des interactions significatives, ce dispositif fournit avec seulement 5 traitements les mêmes informations que le factoriel NPK à 8 traitements (2³) que l'on a présenté dans le chapitre précédent.

Par simple comparaison de NPK avec respectivement 0PK, N0K et NP0, on voit par l'utilisation de la p.p.d.s. , si N, P et K ont un effet sans courir le risque d'en masquer le potentiel par l'absence d'un des 2 autres éléments ; le témoin absolu T00 permet d'évaluer l'effet des 2 autres éléments, à titre d'illustration : la comparaison de NPK et 0PK permet de tester l'effet de N (par la p.p.d.s.) ; soit NPK-N0K → effet de P ... et N0K-T00 → effet de N et K

On peut concevoir des variantes du dispositif en incluant les éléments secondaires S, Ca et Mg ajoutant un ou plusieurs de ces éléments. Par exemple : NPKS, NPK, NPS, NKS,

³⁵ Diagnostic foliaire.

PKS et le témoin absolu : soit 6 traitements ; on peut remplacer S par B (le bore), ou Ca, ou Mg. Il sera plus simple de procéder par étape pour limiter le nombre de traitements.

Ainsi une fois que l'on aura mis en évidence la nécessité d'apporter N, P, K et S, et que l'on aura déterminé avec des courbes de réponse les doses de correction rentables pour ces éléments, le nouveau témoin sera la fumure vulgarisée TV = NPKS (ici TV donne le niveau de départ voir § 5.2.1). On pourra alors tester par exemple le calcium, et le magnésium et un oligo-élément(OE) avec encore 5 traitements : soient : TV, TV+Ca+Mg+OE, TV+Ca+Mg, TV+Ca+OE, TV+Mg+OE : on effectue des comparaisons entre traitements : ainsi pour tester l'effet de Mg, on compare TV+Ca+Mg+OE et TV+Ca+OE.

L'apport d'une forte dose d'azote (200 kg/ha sur maïs par ex) permet de diluer l'élément dont on suspecte une déficience possible et ainsi d'exacerber sa déficience (l'azote stimulant la croissance végétative « dilue » l'élément étudié).

Cas des déficiences en oligo-éléments

Le cas particulier de l'identification ou la confirmation d'une déficience en oligoéléments, comme par exemple celle en bore pour le coton qui a été testée et confirmée ainsi que celles en cuivre et/ou en zinc pour le maïs qui ne sont pas exceptionnelles en Afrique, peut se traiter plus simplement. Ces déficiences sont suggérées par des symptômes visuels quand elles sont très marquées, sinon par le diagnostic foliaire et ...la bibliographie. Dans le cas des O.E., les interactions ne sont pas à craindre, le dispositif soustractif peut être utilisé, mais n'est plus nécessaire ; il suffit d'ajouter dans un essai dont le témoin est la fumure vulgarisée NPKSCaMg = TV, des traitements recevant la même fumure plus du bore et/ou du cuivre et/ou du zinc... : si la déficience en cuivre est nette la différence : TV-TV(+Cu) sera significative et le diagnostic foliaire corroborera le résultat.

5.3.2 : Les courbes de réponse à un seul élément

La recherche de la dose convenable (optimale ?) à apporter pour compenser la déficience en un seul élément, par exemple l'azote sur maïs, est l'application la plus courante de l'essai à un seul facteur. En supposant que seuls les 3 éléments majeurs soient nécessaires, on comparera au témoin ne recevant que PK, mais pas de N : n_0 , des traitements recevant outre la fumure uniforme PK des doses croissantes de N : n_1 , n_2 , n_3 ,...soient les traitements : $T_{n_0}PK$, $T_{n_1}PK$, $T_{n_2}PK$, $T_{n_3}PK$...

Les doses d'azote n_0 , n_1 , n_2 , n_3 ,...doivent respecter une progression arithmétique pour pouvoir ajuster la courbe à celle d'une fonction. Le plus couramment on retient : 0, 30, 60, 90 kg N/ha dans cette zone,... . Dans un pays où le prix des engrais est grevé par les frais d'acheminement et est élevé par rapport à celui des produits récoltés, il est en outre logique de ne tester que des formes concentrées ; en premier lieu, l'urée pour l'azote à des doses faibles, les seules qui puissent avoir un bon index de productivité (loi des rendements moins que proportionnels), donc être rentables (revoir chapitre 3, § 3.5...)

On pourrait penser ajouter un témoin absolu T00 ne recevant aucun engrais pour évaluer la réponse à la seule fumure PK en le comparant au T0 ($N_{n_0}PK$); mais cette évaluation sera biaisée, très sous-évaluée, du fait de l'absence d'azote qui s'avère être un grave facteur limitant ; cette différence est donc sans véritable valeur. Pour la même raison, la différence : $T_{n_1}PK - T_{n_0}PK$ ne sera pas due au seul effet de l'apport de la 1^{ère} dose d'azote, car en l'absence d'azote la fumure PK ne marquera pas, ou peu (loi du 1^{er} facteur limitant),

mais à celui de l'ensemble n_1PK ! Comme on l'a dit dans un § précédent, il ne faudra pas faire l'erreur de surestimer l'index de productivité réel de cette 1^{ère} dose. Ce sont les index de productivité des 2^{ème} et 3^{ème} doses qu'il faudra prendre en considération pour juger de leur intérêt économique (voir figure 5.1 : valeur des IP).

Il est possible d'ajuster la production des différents traitements à une droite ou à des courbes classiques, comme un segment de parabole ou de courbe de Mitscherlich, en utilisant une application spéciale des contrastes orthogonaux et déterminer ensuite la dose optimum à apporter (voir annexe chapitre 4 « annexe statistique réduction des données brutes, ... p : 7 et suivantes et XXX).

Deux essais « courbes de réponse » à l'azote, conduits à Madagascar dans les années 70, illustreront la question (voir les figures 5.1 et 5.2).

Le premier destiné à calibrer le diagnostic foliaire de l'azote sur maïs, teste l'effet des doses 0, 45, 90, 135, 180, 225 kg N (soit 100, 200, ..., 500 kg urée/ha) en présence d'une forte fumure P, K, Ca, Mg. Les rendements correspondants et les valeurs associées du DF pour l'azote sont représentés dans la figure 5.1. Les rendements ont été ajustés sur une courbe de Mitscherlich caractéristique des rendements moins que proportionnels. Les index de productivité (IP) passent de 29 kg³⁶ de grains par kg N pour la 1^{ère} dose, à 20, puis 15 et enfin 5 kg grains par kg de N³⁷ pour les doses supplémentaires suivantes, soit respectivement environ 14, 9,7 et 2 kg de grains par kg d'urée. La dose optimum dépendra du rapport de prix de l'urée et du maïs³⁸.

Si l'on considère que le maïs mobilise 30 kg d'azote pour produire une tonne de grains avec les pailles correspondantes (cf §1.6 de la 1^{ère} partie), le coefficient d'utilisation apparente de l'engrais est de 87%³⁹ pour la 1^{ère} dose⁴⁰ et 60% pour la 2^{ème}, 45% pour la 3^{ème}, puis seulement 15% pour la dernière.

Les teneurs en N de la feuille du diagnostic foliaire, en % de la matière sèche, sont reportées sur la même figure, leur corrélation avec les rendements est remarquable.

³⁶ IP de 29 pour N entre 0 et 45 kg : soit $(3900-2600)/45$; IP de 15 entre 90 et 135 Kg de N : $(5500-4800)/(135-90)$;

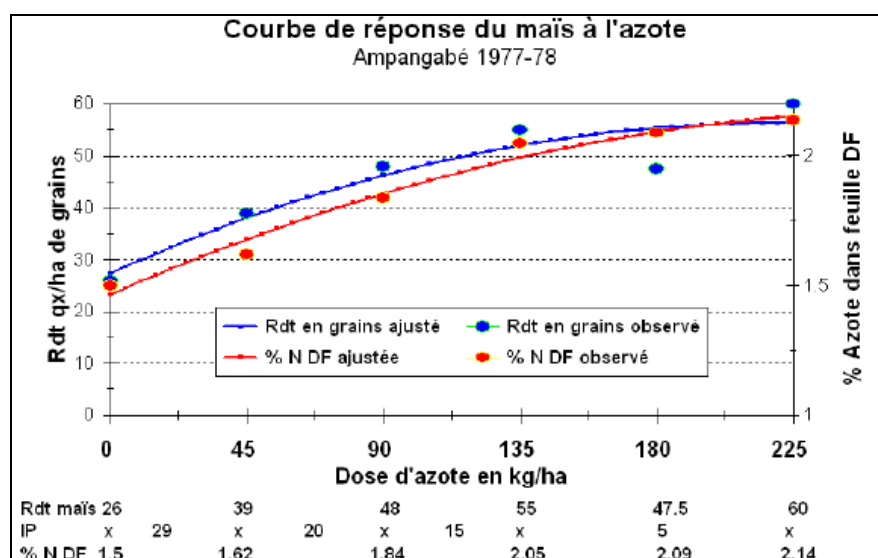
³⁷ Une règle approximative donnait comme seuil d'efficacité à retenir : 10 kg de grains par unité fertilisante.

³⁸ Rappelons qu'il faut retenir les coûts bord du champ pour tenir compte des frais de transport au marché.

³⁹ Puisqu' 1 unité d'azote donne 33.3 kg de grains (1000 /30) et que la 1 ère dose d'azote produit 29 kg de grains, le coef. d'utilisation apparente sera de $29/33.3 * 100 = 87\%$, pour la 2^{ème} dose : $20/33.3*100 = 60\%$; I faut

⁴⁰ Ne pas oublier que l'IP de la 1^{ère} dose de N est en réalité celui de l'ensemble NPK...

Figure 5.1 : courbe de réponse du maïs à l'azote (APG, 1977-78) : production de grain et teneur en N correspondantes des feuilles DF, ajustées à des courbes de Mitscherlich.



A première vue la dose à conseiller est de 135 N (300 kg d'urée) et le seuil de déficience en azote du DF de l'ordre de 2,2. Des calculs sophistiqués à partir de l'équation de la courbe du coût de l'engrais et du prix du maïs donneraient un résultat plus précis, mais assez illusoire. Cela pour plusieurs raisons dont l'imprécision des calculs (de l'ordre de 30 % selon E. Gozé com. pers.).

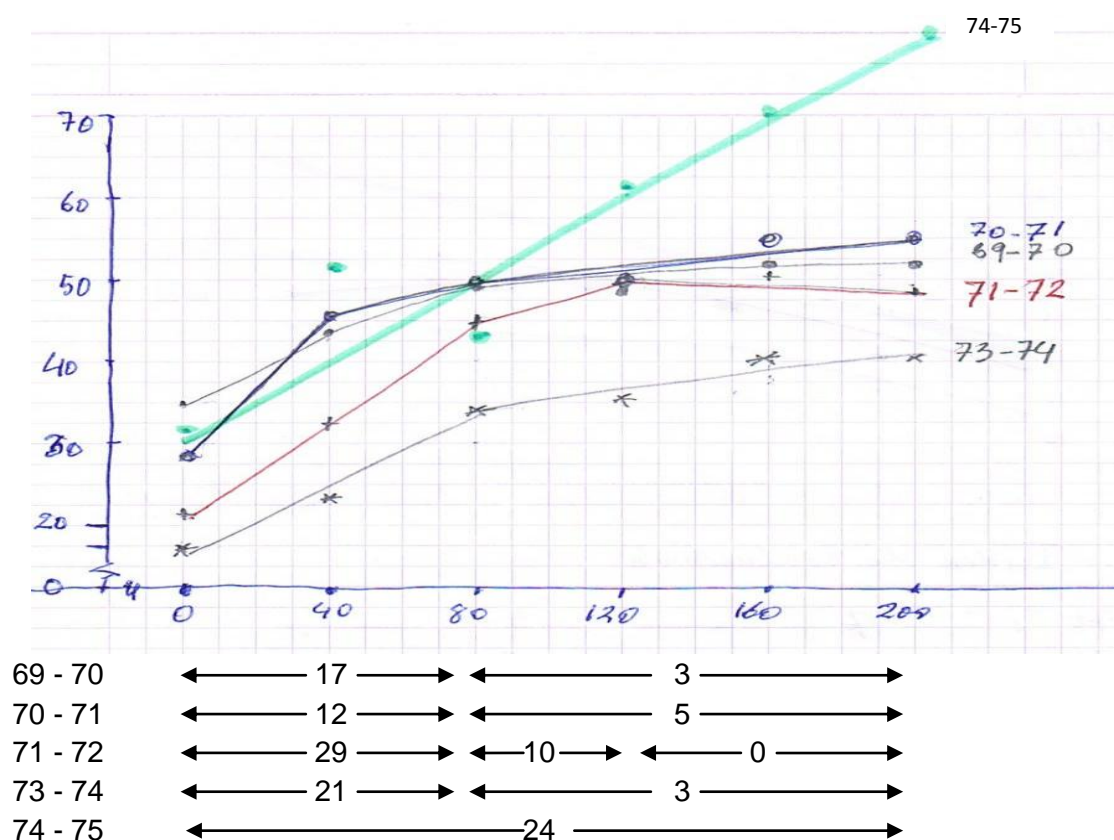
De plus, on sait que la réponse aux engrais peut varier d'une année à l'autre suivant la pluviosité. L'adoption d'une dose d'engrais ou d'une fumure en général doit être validée par son efficacité sur plusieurs années avec des hauteurs et des répartitions des pluies différentes, d'où la nécessité de répéter, en principe, les essais sur le même type de sol dans une région climatiquement homogène⁴¹. Dans le cas des essais sur la fumure azotée, qui n'a pas ou très peu d'effet résiduel, surtout en région pluvieuse, on se contente de reconduire le même essai⁴².

Dans notre deuxième exemple, une même courbe de réponse à 0, 40, 80,...200 kg/ha a été reconduite pendant 5 ans. Les résultats, dont les IP, sont représentés dans la figure 5.2.

⁴¹ Pour la même raison les essais sont répétés sur plusieurs sites pour prendre en compte la variabilité des sols d'une région (voir § 5.5).

⁴² C'est aussi le cas en pratique pour les essais sur le phosphore et la potasse qui ont pourtant de nets effets résiduels.

Figure 5.2 : production de grains de maïs en Qx/ha selon des courbes de réponse à l'azote APG (Madagascar), entre 1969 et 1975.



Commentaires : le graphique reproduit ici manuellement souligne l'illusion des ajustements à des courbes tracées avec plus de rigueur !

Bien que dans l'ensemble les courbes aient un « air de famille », à l'exception de celle de 1974-75, elles traduisent une **grande variabilité interannuelle** tant pour le niveau des rendements du témoin (de 1,7 à 3,5 t/ha) que pour les index de productivité des différentes doses. C'est une confirmation du **côté assez illusoire des ajustements à des courbes précises**. Il suffit en pratique de tracer des segments de droite entre les points observés pour avoir une vue réaliste et suffisante de la réponse approximativement la plus satisfaisante, bon an mal an.

Si on élimine l'année 1974-75 très anormale, on constate que les réponses sont linéaires entre 0 et 80 kg de N, avec un index de productivité moyen sur 5 ans de 20 kg de grains /kg d'azote, (15 les deux premières années et 25 les deux suivantes, donc variable) et un IP moyen de 4 entre 80 et 160 kg de N/ha.

Les écarts entre années ne peuvent s'expliquer que par des différences de pluviosité, sauf accident (maladie, parasite...). **L'examen des bilans hydriques de chaque année** doit donner les causes rationnelles des différences interannuelles.

Une analyse de variance interannuelle, généralisation de celle sur les résultats de chaque année, dira si les effets des années sur la production et leurs interactions avec les réponses aux traitements sont statistiquement significatifs ; (voir § 5.5.1 et annexe 5.2). **On peut se demander ce que cela apporte de plus que les informations des bilans hydriques ?**

5.3.3 : Les tests FAO :

Ces tests ont été conduits dans un très vaste programme de la FAO qui a duré une trentaine d'années (1960-1990) et porté sur 25 à 30 pays. Ils étaient destinés à caractériser la fertilité des sols dans les régions en voie de développement.

Ce programme utilise des dispositifs ingénieux à 2 et 3 facteurs, ou même plus, à plusieurs niveaux, **mais ne s'encombrant pas de toutes les combinaisons factorielles** ; c'est une solution de remplacement pratique aux lourds essais factoriels complets. Ils font l'impasse sur l'analyse statistique des interactions, ce qui n'a pas beaucoup d'importance au stade actuel de nos connaissances en région soudanaise ; **répétons que les interactions ne sont sensibles qu'en cas de présence ou absence d'un élément lorsque la loi du 1^{er} facteur limitant joue vraiment.**

Les principaux dispositifs incluent un essai soustractif et des courbes de réponse à seulement 3 niveaux, exceptionnellement 4. Chacune de leurs composantes peut être interprétée séparément, car **il est légitime quand cela est précisé à l'avance, de ne retenir pour l'interprétation statistique qu'une partie des traitements d'un essai.**

Le cas le plus simple ne retient que 5 des 9 traitements d'un factoriel 3^2 , par exemple pour l'essai $P \times K$: $(P_0-P_1-P_2)(K_0-K_1-K_2)$, avec ou sans un apport uniforme d'azote (ici à la dose 1 sur tous les traitements) :

100, 101, 102, 110, 111, 112, 120, 121, 122 qui retient les doses croissantes de P ou K, à 3 niveaux : 0-1-2 ; en pratique : nul, faible et moyen (ou nul, moyen et fort) en présence des 2 autres éléments au niveau 1 ; les niveaux pouvant être par exemple 0-30-60 kg/ha P_2O_5 et K_2O et pour la dose uniforme d'azote : 45 kg/ha N.

L'usage prévaut de prendre la dose vulgarisée pour le niveau 1 et la dose double pour le niveau 2

On peut représenter le dispositif plus clairement sous la forme d'une grille où les 2 « courbes de réponse⁴³ » au phosphore et à la potasse se croisent :

Figure 5.3 : schéma du test de base pour 2 éléments à 3 niveaux (N est fixé au niveau 1)

		Courbe de réponse à P	
		101	
Courbe de réponse à K	110	111	112
		121	

En ajoutant le traitement : 011 on dispose en supplément d'un soustractif sur N en comparant 111 à 011.

L'intérêt de ce procédé est surtout manifeste dans les essais $N \times P \times K$ où les 3 éléments N, P et K figurent chacun à 3 niveaux avec seulement de 7 à 9 traitements (au lieu de $3^3 = 27$!), c'est à dire les 7 traitements de base :

⁴³ bien qu'il soit irréaliste de parler de courbe de réponse avec seulement 3 points, car on peut y faire passer toute courbe, y compris un cercle !

0-30-30, 30-30-30, 60-30-30, 30-0-30, 30-60-30, 30-30-0, 30-30-60, auxquels on peut ajouter un témoin absolu 000 et une dose NPK double (car les engrais disponibles en Afrique sont souvent sous forme « ternaire » ex 15-15-15)

Avec 7 traitements, on y trouve les 3 « courbes de réponse » à N, P et K, plus le soustractif NPK sans le témoin T000. En y ajoutant 2 traitements : T000 et T222, on ajoute la courbe de réponse à NPK (voir figure 5.4).

Figure 5.4 : schéma d'un test à 3 éléments (NPK par exemple) :

Courbe de réponse NPK	T000		T222	<i>T000, T111, T222</i>
Courbe de réponse N	T011		T211	<i>T011, T111, T211</i>
Courbe de réponse P	T101	(T111)	T121	<i>T101, T111, T121</i>
Courbe de réponse K	T110		T112	<i>T110, T111, T112</i>

En italique : rappel des traitements impliqués dans chacune des courbes

La 1^{ère} colonne représente un soustractif NPK. On note également que la 2^{ème} colonne ne retient qu'un seul traitement T111 que l'on peut qualifier de pivot, ce qui réduit le nombre de traitements à 9.

On peut concevoir bien des variantes à partir du module de base à 7 traitements de l'essai précédent : soit en ajoutant une 4^{ème} et même une 5^{ème} dose d'un des éléments, l'azote le plus souvent pour obtenir une véritable courbe de réponse ; soit en testant un ou deux nouveaux éléments : d'abord Ca, puis Mg ou S ou même un oligo-élément.

La FAO y avait associé le **concept curieux des blocs dispersés à une seule répétition** par site ; chacune étant mise en place dans le champ d'un paysan volontaire ; l'ensemble des répétitions réparties sur des km de distance, et mêmes différentes régions entières, était supposé constituer un seul essai avec de très nombreuses répétitions. Cette idée a été vivement critiquée par tous les statisticiens (Boyd). Il n'est pas possible d'y faire la part du sol, de la pluviométrie locale et de la date de semis sur les résultats ; ceux-ci ne pouvaient être analysés légitimement. Cette erreur éliminée, ces dispositifs avec **seulement deux répétitions** sont très intéressants au stade des besoins actuels de l'expérimentation.

5.3.4 : Les carrés latins : ce ne sont pas des blocs de Fisher à proprement parler, mais ils s'y apparentent par l'esprit.

Ils sont supposés **contrôler deux gradients de fertilité perpendiculaires** dans le même champ ; **en réalité, ils permettent de diminuer un peu plus la part de variance résiduelle en augmentant celles des blocs** dont le nombre est multiplié par deux de façon critiquable **par rapport au principe de distribution au hasard**. Un carré latin a par définition autant de lignes que de colonnes ; dans un carré latin à x lignes et x colonnes, les x traitements se retrouvent **une fois** dans chaque ligne et chaque colonne (les traitements ne sont **donc pas distribués véritablement au hasard**). Par exemple un carré latin 4x4 peut se présenter comme dans la figure 5.5 :

Figure 5.5 : Carré latin 4x4 :

T0	T3	T2	T1
T1	T2	T0	T3
T3	T0	T1	T2
T2	T1	T3	T0

Les traitements pourraient correspondre à 4 niveaux d'une courbe de réponse :

N = 0, 30, 60 et 90 kg N/ha en présence d'une fumure
PK...uniforme.

C'est un dispositif très classique traité par tous les logiciels d'analyses statistiques. Il n'est à utiliser que lorsque le nombre de traitements est faible, c'est-à-dire pour des essais assez élémentaires, sinon dès que le nombre de traitements est supérieur à 6, il prend beaucoup de place (autant de blocs que de traitements évidemment).

5.4 Dispositifs avec subdivision des parcelles

5.4.1 split-plots

On y distingue des traitements principaux indépendants et des traitements secondaires dépendants des premiers ; l'analyse statistique est un peu plus complexe et **la sensibilité moins bonne** sur les traitements principaux que dans le cas des blocs de Fischer (voir l'analyse de variance en annexe 5.1).(voir également M. Lecompt CD rom chap.4 « expérimentation et les engrais »)

Ils ne sont pas d'un grand intérêt dans les études strictement de fertilité ; sauf peut être pour tester au niveau des traitements secondaires de nouvelles déficiences, en oligo-éléments en particulier : on peut dans ce cas utiliser une plante test demandant des parcelles élémentaires plus petites. Par ex., on a mis au point une fumure NPKCa dans un essai sorgho de longue durée, avec des parcelles de 80 m², on testera l'effet de certains OE sur une culture prenant peu de place (arachide ...) ayant la même sensibilité aux carences en ces OE, **ici, chaque parcelle de l'essai NPKCa est subdivisée en sous parcelles (traitements secondaires portant des doses croissantes de l'OE à étudier).**

En revanche, ils sont pratiques dans le cas d'essais variétaux à plusieurs niveaux de fumure, les traitements principaux étant le niveau de fumure (témoin 0, fumure vulgarisée, fumure forte), les traitements secondaires étant les variétés. On peut garder les traitements principaux (niveau fumure) d'une année à l'autre et par contre changer, (suivant les résultats) certaines variétés, **sauf les témoins.**

Figure 5.6. Plan d'un Split plot: Fumure x variétés

	Répétition I			Répétition II	
T1	T3	T2		T2	T1
Vo	V1	V2		Vo	T3
V2	Vo	Vo		V2	Vo
V1	V2	V1		V1	V2
				Vo	V1

3 traitements principaux fumures : T1 = témoin 00 ; T2 = fumure vulgarisée ; T3 = T2+N

3 traitements secondaires variétés : Vo = témoin local ; V1 = nouvelle variété X ; V2 = nouvelle variété Y

5.4.2 : Criss-cross ou "bandes croisées"

Ils font également intervenir 2 facteurs de manière non indépendante et de façon encore plus étroite, on distingue toujours les traitements principaux et les traitements secondaires, aucun n'étant indépendant ; l'analyse statistique est encore plus délicate que pour le split plot et la sensibilité encore moins grande (voir analyse de variance en annexe 5.1). Ces désavantages perdent beaucoup de leur importance quand on les conserve plusieurs années de suite et que le terrain s'homogénéise. Ils ne sont recommandés que comme essais-démonstration d'assez longue durée en points d'essais multilocaux où ils sont très convaincants.

La figure 5.7 représente un criss-cross type d'essai-démonstration sur les interactions entre la fumure organique (témoin /pailles exportées / pailles restituées sous forme de fumier) et les fumures minérales (soustractif NPK...)

Figure 5.7 Exemple de criss-cross



La fumure organique est apportée sur les traitements principaux distribués au hasard, ici les bandes horizontales ; les traitements secondaires sont distribués au hasard seulement sur la première bande de chaque bloc qui impose le même ordre pour chaque bande verticale. Un bloc est agencé de façon arbitraire, ici, le III, pour que la démonstration soit plus lisible sur le terrain.

La fumure organique est apportée sur les traitements principaux distribués au hasard, ici les bandes horizontales, les traitements secondaires sont distribués au hasard également dans chacune de ces bandes, sauf de façon arbitraire dans un des blocs (le III par ex) pour que la démonstration soit plus lisible sur le terrain.

5.5 : Dispositifs répétés en plusieurs lieux et /ou sur plusieurs années

«Dans la pratique, le choix d'un traitement ne se justifie que s'il manifeste sa supériorité dans une large zone de culture, et la maintient au cours d'années successives» (Vessereau, 1960).

On a abordé plus haut, à partir du 2^{ème} exemple de courbe de réponse à N, la question des essais répétés ou reconduits pendant plusieurs années, de la variabilité de leurs résultats, de leur interprétation par les bilans hydriques et de l'intérêt discutable de leur interprétation statistique.

La nécessité de répéter les essais sur plusieurs sites est à première vue⁴⁴ évidente ; la fertilité diffère avec les types de sols et les fumures qui en résultent et doivent varier en conséquence. Les essais doivent donc être conduits en parallèle dans les différentes zones agro-climatiques et leurs principaux types de sols agricoles. **La qualité du zonage est alors très importante.**

Comme pour les essais pluriannuels, on peut faire une analyse statistique du groupe d'essais en distinguant les effets **des sites et de l'interaction traitements x sites** sur les rendements des traitements, (les réponses sont-elles différentes d'un site à l'autre ?). Cela paraît une évidence si le zonage est correct et que les sols sur lesquels on expérimente sont bien différents. Cependant, on peut se demander si les différences entre sites sont attribuables aux sols ou à la pluviosité, pour peu que les sites soient éloignés, ne serait-ce que de quelques km. **Ici encore l'examen critique des conditions d'expérimentation et le bon sens sont plus importants que les tests statistiques.**

La situation encore plus complexe est celle des essais pluriannuels sur plusieurs sites. L'analyse statistique en est encore plus compliquée et son intérêt, par rapport à l'examen critique de l'environnement (sol et climat) de chaque essai, plus problématique.

Cette complexité serait en principe théorique dans la mesure où les expérimentations par zone et type de sols peuvent être considérées comme indépendantes. Il en est différemment en pratique, car **les Sociétés de Développement recherchent des formules uniques sur de vastes zones** pour importer une formule d'engrais complexe à moindre coût par économie d'échelle. Le constat fait dans la première partie selon lequel **la fertilité est à la longue plus le produit du système de culture que de la nature du sol** est un autre argument en faveur de la formule unique (exemple de l'engrais coton).

(Voir analyse statistique sur plusieurs années plusieurs sites en annexe 5.2.)

5.6 : Réseau d'essais régionaux, de la station au test en milieu réel.

L'objectif concret est de proposer au paysan une **formule rentable et...durable** ; on ne peut la mettre au point directement chez lui et les résultats des essais en station ne sont pas uniformément transférables. On procède par étapes⁴⁵, avec 3 niveaux :

- d'abord dans un ou plusieurs essais de longue durée en station principale régionale ; on y compare un nombre assez important de formules envisageables.
- puis, après deux ou trois ans, on teste l'adaptation des formules les plus prometteuses aux conditions locales variées, sur des points d'essais multilocaux (stations secondaires, fermes semencières ou champ d'essai d'ONG ...). A ce niveau, on collabore

⁴⁴ Bien que l'on ait insisté dans la première partie sur le rôle prépondérant des systèmes de culture sur la fertilité des sols quels qu'ils soient.

⁴⁵ en réalité, on pourrait peut être faire plus vite en profitant des études plus avancées ailleurs

plus étroitement avec les organismes de développement et on choisit au besoin un dispositif de **recherche-démonstration**.

- enfin on vérifie, un ou deux ans après, sur les champs de paysans volontaires l'efficacité de la ou les deux formules localement les plus performantes par des tests qui sont renouvelés pendant quelques années. **La collaboration avec les services de développement qui participent activement à l'expérimentation est ici très étroite.**

L'ensemble du processus devrait prendre 6 ans ou plus quand on part de zéro, ce qui n'est plus le cas.

5.6.1 : Dimensions des parcelles élémentaires et nombre de traitements

Dimension des parcelles : beaucoup de facteurs entrent en compte dans le choix de la taille des parcelles élémentaires, entre autres :

- la nécessité d'avoir un certain nombre de plants dans la parcelle utile, ce qui prend d'autant plus de place que les plantes sont plus grandes, par ex. le maïs ou le mil comparés au riz ou l'arachide.

- la nécessité d'avoir des lignes de bordure, avec la même remarque sur la taille des plantes.

- la taille du terrain d'expérimentation dont on dispose, compte tenu du nombre de traitements et de répétitions que l'on veut mettre en place.

- **éviter les micri-variations de fertilité qui sont dangereuses sur les trop petites parcelles.**

- l'obligation d'effectuer les travaux comme le semis ou l'épandage des engrais...dans la même journée ; ce qui, sans parler du coût des travaux, élimine les trop grandes parcelles.

L'hétérogénéité plus grande du terrain dans les champs paysans qu'en milieu contrôlé ; un champ cultivé en station ou en point d'essai multilocal pendant plusieurs années de manière uniforme s'homogénéise (le revers de la médaille est **qu'il est de moins en moins représentatif des conditions réelles**).

Cette question s'est posée depuis longtemps ; les institutions de recherche ont adopté des normes plus ou moins empiriques ; en général les anglo-saxons et les instituts internationaux adoptent des parcelles plus petites que les francophones. Les Instituts précurseurs du CIRAD utilisaient des parcelles élémentaires de 60 à 80m² (5 lignes de 15 ou 20 m de long écartées de 0.8 m) pour les plantes de grande taille (mil, sorgho, maïs, manioc, coton...) et de 20 à 40 m², soit environ la moitié des précédentes, pour les plantes de petite taille (riz, arachide, soja ...).

En station où les sols ont été homogénéisés par des années de culture, un peu trop malheureusement pour leur représentativité des conditions paysannes, on peut en principe prendre des parcelles plus petites que dans les essais multilocaux ; cependant, dans le cas de ces derniers, on est souvent limité par la taille du terrain disponible.

Nombre de traitements : en station principale, l'essai de longue durée comprend pour dégrossir la question plusieurs facteurs et donc peut nécessiter un assez grand nombre de traitements: de 16 à 24, combinant certains des facteurs à différents niveaux. En station secondaire, 6 à 8 traitements paraissent suffisants. Dans les champs paysans où il est le plus difficile d'assurer le bon déroulement des tests, 3 ou 4 sont un maximum.

5.6.2 : Durée des essais pour les 3 niveaux d'expérimentation :

En station régionale pour les essais de longue durée, 6 ans au moins, soit 3 cycles coton-sorgho dans notre exemple, sont au minimum nécessaires pour :

- évaluer l'effet de distributions différentes de la pluviosité annuelle (année sèche, année humide, année moyenne) sur les réponses aux traitements, donc la rentabilité, bon an mal an, de la fumure testée.
- évaluer l'effet cumulatif des apports répétés d'engrais à distinguer de l'effet direct du 1^{er} apport en 1^{ère} année ; on doit prévoir des traitements supplémentaires pour estimer les effets résiduels des apports des années précédentes (voir tableau 5.2 et § 3.6.4).
- suivre l'évolution des rendements et des réserves du sol dans la durée (analyse « au départ » puis à intervalles réguliers) donc de la durabilité des solutions testées.

Tableau 5.2 : Effet résiduel/effet cumulatif

	1 ^{ère} année		2 ^{ème} année	
Traitements	Fumure	effet	Fumure	effet
Témoin To	000		000	
T npk	NPK	effet direct	NPK	effet cumulatif
T'npk	NPK	effet direct	000	effet résiduel

Ces essais en station centrale gagnent à être quasi permanents pour anticiper l'apparition de nouvelles déficiences entraînées par les prélèvements sans compensation année après année.

Les essais en Points d'essais multilocaux sont destinés à vérifier et confirmer des résultats. Les essais sont de plus courte durée ; l'idéal serait d'avoir les 3 types d'années (sèche, humide, moyenne) en 3 ans consécutifs.

Quant aux tests en milieu paysan, il est très difficile de les conserver plus d'un an, on considère que deux ans est le maximum (Mutsaers, 1986). Ils permettent au mieux d'évaluer l'effet direct et l'effet résiduel. Il faut en pratique les déplacer d'une année à l'autre.

5.6.3 : Nombre de répétitions.

Le nombre de répétitions dans les différents niveaux d'expérimentation peut être d'autant plus faible que les essais sont répétés dans des localités plus nombreuses, que leur durée est plus longue et que le dispositif est factoriel.

Pour les essais en stations, on recommandait autrefois un nombre assez élevé de répétitions : 6 ou 8 pour tenir compte de l'hétérogénéité initiale du terrain. C'est toujours à conseiller pour un essai de courte durée (à 3 ans). Par contre, le terrain s'homogénéisant avec le temps, on peut se contenter de 4 répétitions pour les essais de longue durée, ce qui doit être le cas en général.

On peut se contenter de 3 ou 4 répétitions en station régionale. Pour les tests dans les champs de paysans deux répétitions sont nécessaires et suffisantes, il est d'ailleurs très difficile d'en avoir plus. Il faut avoir fait un zonage et une stratification soignés.

Dans les essais multilocaux et dans les tests en champs paysans, l'analyse statistique des résultats indique s'il y a ou non des « interactions » entre les sites d'essais et les traitements, c'est à dire si la réponse aux traitements n'est pas la même sur les différents

sites. L'existence d'interactions ne gêne pas, c'est même naturel quand on a fait un zonage correct et même une aide à l'amélioration de ce zonage s'il y a des « interactions » l'interprétation des résultats sera alors particulière à chaque site, ou chaque groupe de sites ayant le même genre de réponse ; s'il n'y a pas d'interaction, les résultats sont interprétés globalement.

5.7 : Rotations, essais avec plusieurs séries :

Dans un essai portant sur une rotation, prenons le cas le plus simple de la succession de 2 cultures, coton-sorgho par ex. . Il est nécessaire de dédoubler l'essai pour avoir une série pour le coton et une autre pour le sorgho. Ainsi, on dispose d'un résultat donnant tous les ans l'effet de sa pluviosité particulière sur chacune des deux cultures. On parle **d'essais en séries**. Pour une rotation de 3 ans (3 cultures), il faudrait trois séries...ce qui devient vite très lourd. Une solution est d'étudier séparément les différentes successions de deux cultures (ou binôme dans le jargon du CIRAD) qui sont compatibles, étant de bons précédents l'une pour l'autre. On peut ensuite combiner les successions deux à deux pour raisonner, sans expérimenter, sur des rotations plus complexes : ainsi, ayant mis au point la fumure du binôme coton-sorgho et celle du binôme sorgho-arachide, on est en mesure d'avoir une idée de celle de la succession coton-sorgho-arachide. Cette approche est d'ailleurs conforme à la réalité, les paysans choisissant leurs cultures d'une année en raison de leur intérêt économique du moment (prix de vente et débouchés), plutôt qu'en fonction d'une rotation stricte. (R. Tourte, com. pers.)

Reprenons l'exemple coton-sorgho dans lequel la fumure du coton est déjà déterminée alors que celle du sorgho doit être mise au point. La 1^{ère} année de culture du coton dans une série tous les traitements recevront la fumure uniforme vulgarisée, (cette 1^{ère} année ne diffèrera en rien d'un essai à blanc) ; en 2^{ème} année, les traitements seront déjà différenciés par les apports d'engrais sur sorgho ; en 3^{ème} année la série sera à nouveau cultivée en coton avec fumure uniforme, mais les traitements seront aussi différenciés par les effets résiduels des apports sur sorgho.

Tableau 5.3 : principe des séries

Série	année	1	2	3	4	5	6	7
1 ^{ère}	Culture	C(1)	S(2)	C(3)	S	C	S	-
2 ^{ème}	Culture	-	C(1)	S(2)	C(3)	S	C	S

(1) : effet de la fumure coton uniforme.

(2) : effet des fumures NPK sorgho différenciées.

(3) : effet de la fumure coton uniforme (effet cumulatif + effet résiduel des apports sur Sorgho).

Culture: coton: C.; sorgho: S.

Ce dernier paragraphe a été inclus pour ne pas négliger une question théoriquement importante bien qu'ayant suscité des hésitations de la part des intervenants. Une expérimentation pluriannuelle sur une rotation est une entreprise difficile à gérer, sans parler de son coût, et l'analyse statistique de ses résultats est compliquée ; il convient de ne pas être trop ambitieux et, comme pour les essais multilocaux pluriannuels, de disposer d'un Service de méthodologie compétant avant de s'y lancer. **Une démarche plus modeste s'appuyant sur les nombreux acquis en zone soudanienne et un bon sens critique paraît préférable.**

Chapitre 6 : de la conception du protocole à la rédaction du compte rendu de l'essai

Les chapitres précédents traitaient des connaissances utiles à l'expérimentateur pour entreprendre un essai. Nous allons maintenant énumérer la succession des opérations de la conception et de la rédaction du protocole, de la conduite de l'essai jusqu'à l'interprétation de ses résultats ; enfin, de la rédaction du compte rendu de l'essai. Chaque étape sera décrite de façon générale un peu abstraite et illustrée par l'exemple de l'essai **fictif LCTB⁴⁶** dans l'annexe 6 où sont reportés : le protocole, l'analyse statistique des résultats, puis le compte rendu final de l'essai.

Le calendrier de travail de l'expérimentateur est calé sur l'année agricole : de début avril à fin mars.

Figure 6.1 : calendrier de travail

Stade de la culture	mois	travaux
	Avril	Implantation des essais
	Mai	Travail du sol, fumure de fond
levée	Juin	semis
	Juillet	Apport N complémentaire, sarco-binages
montaison/épiaison	Août	sarclages
maturation	septembre	
	octobre	Récolte : pesées, mesures, etc ...
	novembre	
	décembre	Création dossier résultats bruts
	janvier	
	février	Analyse statistique & rédaction du rapport de campagne
	mars	
		Nouvelles propositions, nouveaux protocoles, préparation prochaine campagne
		Comité de programmation : acceptation ?
		Restitution des résultats aux partenaires

Il est impératif de le respecter et de ne pas prendre de retard pour semer au moment favorable, selon la précocité de la saison des pluies, donc en mai éventuellement. Pour cela :

- examiner de près les résultats de la précédente campagne dès qu'ils sont disponibles, **sans attendre leur analyse statistique au besoin,**
- rédiger le protocole en fonction des résultats que l'on vient d'obtenir et prévoir les moyens nécessaires avec leur coût,
- choisir le terrain d'essai (en compagnie d'un pédologue dans l'idéal), rédiger le contrat avec le paysan volontaire dans le cas des tests en milieu réel, effectuer le piquetage,
- préparer le matériel nécessaire : semences, sacs d'engrais pesés par parcelle.

6.1. Etablir un dossier préparatoire de l'essai plus ou moins informel.

C'est un préalable nécessaire au chercheur pour clarifier ses idées et nécessaire pour présenter l'essai, en le justifiant, à sa hiérarchie et à ...d'éventuels bailleurs de fonds. Il

⁴⁶ Essai fictif rappelons le, faute d'avoir pu s'appuyer sur un exemple local concret proposé par les participants et d'avoir prévu de venir avec un (ou des) exemple(s) concret(s) pris ailleurs, selon les spécifications des termes de référence de la mission : « Pré-requis : les participants à l'atelier fourniront à l'arrivée du consultant les protocoles, résultats, rapports de campagne et études relatifs au sujet. Ils auront pris connaissance des études menées sur la zone soudanienne ».

mentionnera les travaux antérieurs locaux et le stade d'avancement des travaux (essai exploratoire en station, confirmation en points d'essais multilocaux, ou test en champ paysan), un compte-rendu de la recherche bibliographique, les résultats des consultations avec le développement et les paysans.

6.2 : protocole type

Le protocole est un outil de travail, à l'usage du chercheur et de son assistant sur le terrain, ne contenant que les instructions nécessaires à la conduite pratique de l'essai ; il n'est pas recommandé de l'alourdir avec des informations qui ont leur place dans le dossier d'essai.

Le protocole type comprend plusieurs rubriques (qui ne sont pas toujours indispensables) :

- le titre court, mais aussi explicite que possible, et une identification : l'année en cours et l'âge de l'essai, un n° qui l'identifie, le programme dont il dépend avec les chercheurs responsables et associés responsable ;

- le but de l'essai, clair et concis et sa durée : un essai de fertilisation dure nécessairement plusieurs années ; une seule année de réponse à des fumures ne fournit pas d'informations suffisantes sur leur efficacité ; sauf exception (cas des identifications de carences en oligo-éléments par ex.). En règle générale, il faut tester l'influence du climat de l'année sur la production, les effets résiduels de ces fumures les années suivantes et leurs effets cumulatifs (apports répétés chaque année), puis l'évolution des rendements et des réserves du sol, ainsi que l'apparition de nouvelles déficiences induites par les prélèvements répétés des cultures ;

- l'emplacement (repérable sur une carte), et les précédents culturaux ;

- la plante-test, la variété et son cycle, la densité de semis : en kg de semences/ha et les écartements entre lignes et poquets (éventuellement).

Le dispositif comprend à proprement parler, comme exposé au chapitre précédent :

- un plan d'expérience et un modèle ; ce dernier fournit les modalités de l'interprétation statistique des résultats ; il découle implicitement du choix des traitements.

Il n'est pas utile de le faire figurer sur le protocole, mais il doit figurer dans le dossier de l'essai avec les modalités prévues, et rappelées ci-dessous, pour l'analyse statistique.

Le plan d'expérience peut être un bloc de Fisher, un split-plot. ..., il précise le nombre de traitements (éventuellement de sous traitements), le nombre de répétitions, les dimensions des parcelles élémentaires et des parcelles utiles. Il est complété par un plan de masse orienté (indiquant le nord et le sens de la pente, y figurent les blocs et la répartition des traitements (numérotés dans chaque bloc ; il est complété avec avantage par le schéma d'une parcelle élémentaire et sa parcelle utile (voir figure 4.1).

- les traitements présentés dans un tableau dans lequel sont spécifiées les caractéristiques de chaque traitement selon le but de l'essai, les doses d'engrais ou de fumier, leur fractionnement éventuel, la restitution ou non des résidus de récolte ... ; en dessous de ce tableau, on précise sous quelle forme et à quel moment les engrais sont apportés, s'il s'agit de fumier : on en donnera la composition.

L'analyse statistique des résultats doit avoir été prévue et spécifiée.

6.2.1 : Les calendriers prévisionnels des opérations culturales et des mesures ou observations :

Calendrier cultural

Préparation du sol : nettoyage, labour.

Semis.

Epandage, uniforme avant labour, des engrais de fond, puis des apports complémentaires sur la ligne (azote en fin de montaison), puis enfouis par sarclage (et buttage).

Sarclages : 1^{er} sarclage (précoce 10-15 jours après levée), 2^{ème} (à la montaison) et 3^{ème} à la demande selon état du terrain ; buttage éventuel.

Récolte, pesées et enregistrement des résultats : d'abord lignes de bordure, pour dégager les parcelles utiles, puis les parcelles utiles (pour les grains, puis les pailles).

Opérations post- récolte : séchage, égrenage, pesées.

Calendrier de mesures et observations :

Prélèvements de sol

Tenue à jour, décade par décade, du formulaire du bilan hydrique.

Comptage à la levée.

Dates d'épiaison et de floraison.

Prélèvements pour diagnostic foliaire.

A la récolte sur la PU (parcelle utile) : nombre de plants, nombre d'épis, poids de grains secs, poids de 100 grains (sur échantillon).

Prélèvements de sol, éventuel après récolte (pas tous les ans).

6.3 : Conduite de l'essai

La conduite effective de l'essai est dictée par le protocole, compte tenu de l'arrivée des pluies, sauf aléas imprévisibles. Dans la mesure du possible, **le chercheur est présent à toutes les étapes et en contrôle le déroulement**, en particulier les épandages de fumure organique et/ou minérale ; **il tiendra un cahier d'essai** (virtuel actuellement avec l'usage généralisé des portables), **en double de celui du technicien responsable sur le terrain** ; il y notera les dates des opérations culturales, des comptages, des mesures ou/et prélèvements (DF) prévus ainsi que les résultats de ces opérations quand il s'agit de comptages ou de mesures. Les données seront enregistrées sur un plan de l'essai⁴⁷, puis dans le tableau à double entrée (traitements x blocs). Y seront aussi reportées toutes observations éventuelles : maladies et/ou parasites, accidents : verse due à un orage Il est utile de remplir au fur et à mesure la fiche du bilan hydrique décadaire attachée au cahier pour savoir où on en est.

Choix d'un terrain représentatif (avant la première année de l'essai bien sûr !) et signature d'un accord sur les obligations de chacun, avec le paysan volontaire s'il s'agit d'un test en milieu réel, puis piquetage ; prélèvements d'échantillons pour la caractérisation des

⁴⁷ ce qui permet de repérer plus tard, rapidement la provenance de résultats anormaux.

sols « au départ » , en général sur les deux premiers horizons : 0-20 et 20-40cm⁴⁸, description d'un « profil » sur une fosse d'environ un mètre de profondeur ; mise en place (idéalement) d'un pluviomètre (simple boîte de conserve + éprouvette graduée pour les tests).

Préparation des moyens nécessaires : semences (traitées ou non), **sachets d'engrais bien identifiés pour chaque parcelle élémentaire et chaque épandage.**

Mise en place : dès que l'humidité du sol le permet : épandage de la fumure de fond organique et/ou minérale, puis labour ; semis aux premières pluies utiles en début de saison (20 mm) ; sarclages avec éventuellement buttage après épandage de la fumure complémentaire (azote avant 2^{ème} sarclage).

Récolte et enregistrement des résultats bruts : elle doit être très soigneusement préparée, les sacs convenablement identifiés avec des étiquettes pour les parcelles élémentaires disponibles à l'avance (**identification sur le sac + étiquette dans le même sac de prélèvement**).

6.4: Dossier des résultats et esquisse de compte rendu.

- Bilan hydrique de la culture : fiche avec commentaires.
- Résultats parcellaires divers reportés dans des tableaux à double entrée : traitements x blocs⁴⁹ . A titre d'exemple, on donne dans l'annexe 6.3 la production en grains exprimée en tonnes/ha de l'essai LCTB, cela parle mieux que les productions brutes par parcelle (**l'analyse statistique est réalisée sur les données brutes parcellaires**) ; le calcul des rendements ne se fait que sur les moyennes. Chaque mesure et pesée font l'objet d'un tel tableau, indispensable bien sûr pour l'interprétation des résultats.

6.5 Analyse statistique des données pour confirmation ou infirmation des conclusions précédentes (voir encadré en annexe 6.1)

Tableau d'analyse de variance

Commentaires définitifs

6.6 Rédaction du compte rendu analytique définitif, à envoyer immédiatement via la hiérarchie : aux supérieurs en premier lieu, puis aux responsables du développement selon le stade de l'expérimentation (proximité de la vulgarisation).

On y rappelle très brièvement le but et le protocole, puis on rend compte du déroulement de l'essai et enfin de tous les résultats des mesures et observations : moyennes des rendements et de leurs composantes pour chaque traitement avec les conclusions des analyses de variance correspondantes, DF, analyses de sols... Les résultats parcellaires avec leurs analyses statistiques sont fournis en attaché.

³⁶ il n'est pas indispensable de faire des prélèvements sur tous les traitements, on en choisit les plus importants : le témoin absolu, le témoin vulgarisé..... ,

⁴⁹ Avec 3 chiffres significatifs seulement compte tenu des erreurs de pesées

6.7 Suites à donner :

Préparation de la campagne suivante en fonction des résultats : poursuite sans changements ou avec modifications du protocole si l'on conserve l'essai, préparation d'un essai complémentaire éventuellement.

Rédaction d'un rapport de campagne pour l'ensemble des essais du chercheur responsable.

Rédaction d'une synthèse d'étape ou finale selon le cas.

Rédaction d'une communication ou d'un article ; c'est une autre affaire qui sort du cadre de l'atelier.

Conclusion :

Au terme de cette présentation, l'aspiration des auteurs a été de montrer que l'expérimentation agronomique au champ n'est pas réductible à un logiciel aussi performant soit-il ; l'expérimentation demande, outre les connaissances techniques rappelées en 1^{ère} partie, une disposition au travail en équipes pluri-disciplinaires concrétisée par la notion de traitements-passerelle partagés entre différents chercheurs, une intégration des activités dans la durée par l'éclairage des travaux antérieurs en disposant de bibliothèques tenues à jour, mais aussi alimentées régulièrement par les travaux en cours des chercheurs, enfin, l'ouverture aux équipes de recherche sous-régionales.

De part la complexité des facteurs mis en jeu, une expérimentation sur la fertilité de sols s'inscrit dans la durée (trois à cinq années) ; outre la pertinence des hypothèses avancées, le protocole doit être rigoureux : « Nous aboutissons ainsi à la conclusion très importante que pour avoir un bon protocole, il faut avoir prévu **dès la conception de l'essai et non pas au moment du dépouillement des résultats**, comment se fera l'interprétation, grâce en particulier aux comparaisons orthogonales » (M. Lecompt 1962). **L'utilisation des logiciels de traitements des données conforte cette recommandation !**

C'est pourquoi nous nous sommes attardés sur la présentation des comparaisons orthogonales au chapitre 4 en montrant la progressivité des comparaisons des traitements depuis l'analyse simple jusqu'à la méthode des contrastes : « La mise en équations du protocole en symbolisant les questions posées dans un essai par des signes + et -, est un exercice extrêmement profitable parce qu'il évite de mettre en place des essais dont **on tirera peu de renseignements à cause d'un protocole mal construit** » (M. Lecompt 1962).

Compte-tenu des sollicitations des chercheurs (colloques, formations, ...) soulignant l'importance des échanges, le chapitre 6 doit leur permettre de mieux organiser leur calendrier d'activité annuel afin de produire des résultats dans le temps imparti, élément structurant de la chaîne de décision depuis la commission scientifique jusqu'aux attentes des utilisateurs.

Enfin, ces recommandations adressées aux chercheurs ne seront pleinement opérationnelles que si elles s'expriment dans un **cadre institutionnel efficient** : ainsi, c'est au directeur de la station de recherche régionale et des points d'essais rattachés, ou à défaut à son adjoint, de veiller à la bonne gestion des parcelles d'essais (en premier lieu : **l'historique des parcelles** depuis au moins dix années : parcellaires et dispositifs dont apports d'engrais en particulier P peu labile), le poste météo en état de fonctionnement, l'entretien de la bibliothèque, et plus récemment des liaisons internet, sans oublier l'animation scientifique régionale : exposés en interne (chercheurs-techniciens-vulgarisateurs) et nationale, visites fréquentes de la direction scientifique.